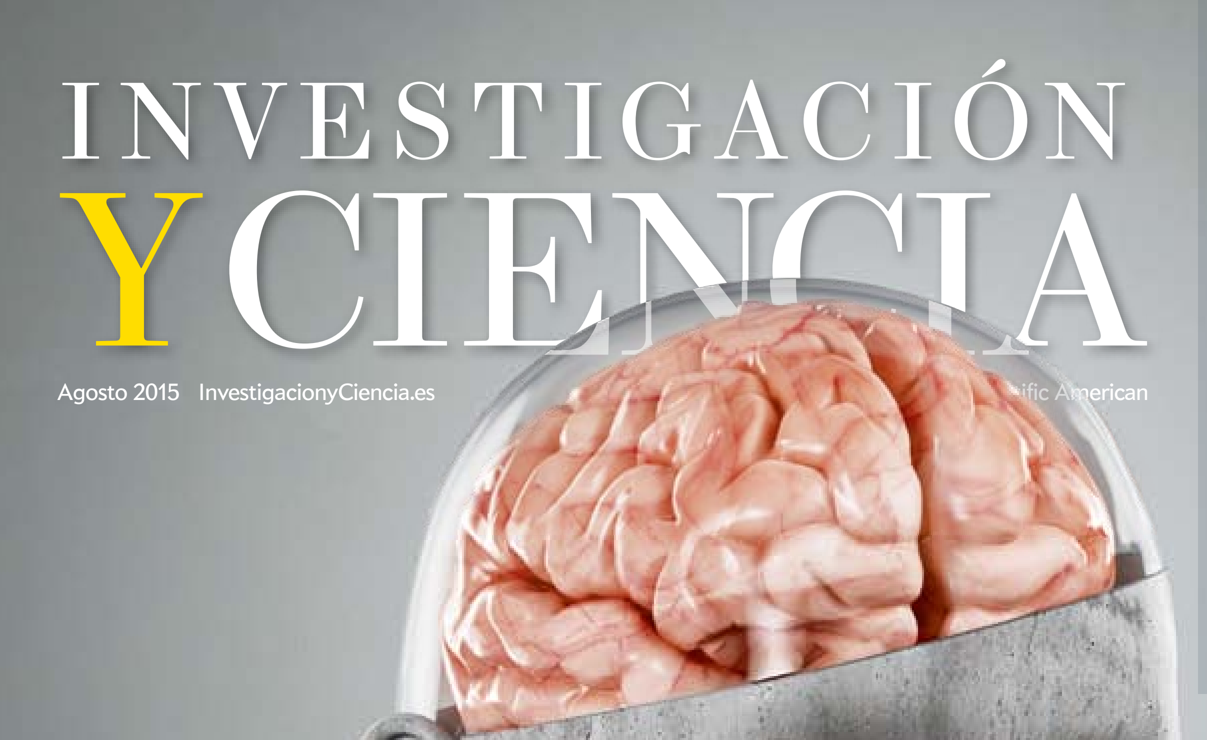


INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2015 InvestigacionyCiencia.es

...ific American

MEDIOAMBIENTE
Recuperación de zonas húmedas

MATERIALES
Física de los aislantes topológicos

EPIDEMIAS
Mosquitos que combaten el dengue

Las singularidades del cerebro adolescente

Unas redes neurales muy versátiles promueven la agilidad mental y la atracción por el riesgo



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

EL CEREBRO ADOLESCENTE | RESTAURACIÓN DE ZONAS HÚMEDAS | AISLANTES TOPOLÓGICOS

AGOSTO 2015 N.º 467



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Agosto 2015, Número 467

ARTÍCULOS

NEUROCIENCIA

14 La plasticidad del cerebro adolescente
¿Por qué a los jóvenes les atrae el riesgo? ¿Por qué aprenden con tanta agilidad? La clave reside en la versatilidad de sus redes neurales.
Por Jay N. Giedd

COSMOLOGÍA

20 Toda la luz del universo
Cada galaxia existente en el cosmos lleva emitiendo luz desde el principio de los tiempos. Tras años de búsqueda, los astrónomos han comenzado a detectar esa luz de fondo extragaláctica.
Por Alberto Domínguez, Joel R. Primack y Trudy E. Bell

ESPACIO

26 Un cohete para llegar a Marte
¿Es el Sistema de Lanzamiento Espacial de la NASA una maniobra política o la mejor oportunidad de enviar seres humanos al planeta rojo?
Por David H. Freedman

SALUD PÚBLICA

36 Freno al dengue
La vacunación del mosquito transmisor con una bacteria común se convierte en una nueva táctica contra la enfermedad.
Por Scott O'Neill

MEDIOAMBIENTE

50 Límites de la restauración de humedales
Aunque no podemos confiar en que la restauración restablezca los ecosistemas destruidos por los humanos, ciertas medidas podrían mejorar su recuperación. *Por David Moreno Mateos*

58 Recuperar las zonas húmedas
Numerosos proyectos han fracasado en el intento de recrear los ecosistemas primigenios. Pero varias iniciativas recientes han cosechado éxitos al fijarse solo uno o dos objetivos y dejar que la naturaleza siguiera su curso. *Por John Carey*

ARQUEOLOGÍA SUBMARINA

66 En busca de tesoros sumergidos
Gracias a técnicas innovadoras, los científicos pueden explorar naufragios con la misma precisión que en una excavación arqueológica. *Por Philip J. Hilts*

MATERIA CONDENSADA

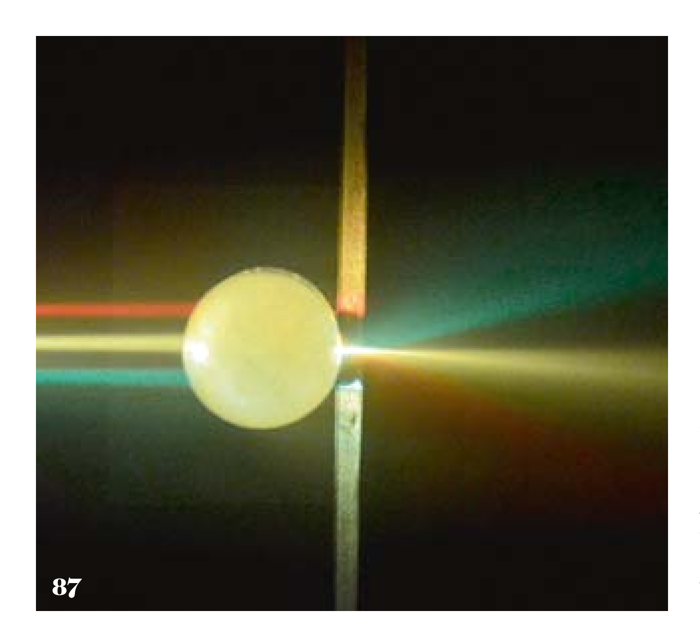
75 Aislantes topológicos
El hallazgo de estos nuevos materiales, aislantes en el interior y conductores en la superficie, ha cambiado la manera de entender las fases de la materia.
Por David Carpentier y Laurent Lévy

80 La búsqueda de partículas de Majorana
Por Ramón Aguado

JEFF WILSON


4


12


87

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes
El desastre que se cierne sobre las presas del Himalaya. La mugre marrón de Europa. La sala con el campo magnético más débil de la Tierra. ¿Alguien me escucha?

7 Agenda

8 Panorama
Cultivos biotecnológicos más resistentes a la sequía. *Por Pedro L. Rodríguez Egea*
Mapa de la regulación epigenética. *Por Dina Fine Maron*
Reservas intocables. *Por Michael Jakob y Jérôme Hilaire*
Los beneficios del conocimiento tradicional sobre las plantas. *Por Manuel Pardo de Santayana y Manuel J. Macía*

44 De cerca
Condritas carbonáceas, mensajeros del pasado. *Por Josep M. Trigo, Carles E. Moyano y Marina Martínez*

46 Historia de la ciencia
Matemáticas y metafísica en la óptica de Kepler. *Por Antoni Malet*

48 Foro científico
Riesgos de la edición genética. *Por Jeantine Lunshof*

84 Juegos matemáticos
Bordes e idealizaciones. *Por Alejandro Pérez Carballo*

87 Taller y laboratorio
El kapnoscopio: ver para creer. *Por Marc Boada y Víctor Grau*

90 Libros
ADN. Unidad del conocimiento. Paleobiología. *Por Luis Alonso*

96 Hace...
50, 100 y 150 años.

EN PORTADA



Durante años, los neurocientíficos (y los padres) se han esforzado por entender el comportamiento inestable de los adolescentes. Ahora, extensos estudios de resonancia magnética están revelando que sus altibajos se deben a cambios profundos en sus redes neurales. Los nuevos conocimientos podrían ayudar a los adolescentes a evitar las enfermedades mentales y tomar decisiones inteligentes para su futuro. Ilustración de FOREAL.

redaccion@investigacionyciencia.es



Junio 2015

AGUJEROS NEGROS FRÍOS

Estoy de acuerdo con el disparatado y divertido artículo de Adam Brown «Minería de agujeros negros» [Investigación y Ciencia, abril de 2015] en que resulta físicamente imposible extraer energía con rapidez de estos objetos. Sin embargo, una de las muchas «trampas» que el artículo pasa por alto es que, cuanto mayor es la masa de un agujero negro, más frío está. Un agujero negro con una masa diez veces menor que la de la Tierra tendría una temperatura inferior a la del fondo cósmico de microondas (2,7 grados Kelvin). Por tanto, cualquier agujero negro con una masa mayor absorbería energía del fondo cósmico y solo crecería —y se enfriaría— aún más. Únicamente los agujeros negros de muy poca masa radian. En el proceso, se tornan cada vez menores y más calientes hasta que finalmente explotan.

Michael Albrow
Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab), Chicago

Responde Brown: *Es cierto que el fondo cósmico de microondas posee una temperatura mucho mayor que la de un agujero negro con una masa similar a la del Sol. Pero eso no durará mucho. A medida que el universo se expande, el fondo de microondas se enfría. Debido a la energía oscura, ese enfriamiento es exponencial: la temperatura del fondo cósmico se reduce a la mitad cada 10.000 millones de años aproximadamente. Por lo que, relativamente pronto, dicho fondo estará mucho más frío que cualquier agujero negro.*

AGUJEROS NEGROS Y ANTIMATERIA

En «Agujeros negros y muros de fuego» [Investigación y Ciencia, abril de 2015], Joseph Polchinski explica que, según Stephen Hawking, cuando un par partícula-antipartícula se forma en las inmediaciones de un agujero negro, una de ellas puede caer en el interior y la otra escapar al infinito. Poco a poco, las partículas radiadas van drenando la masa del agujero negro.

¿No debería ser aleatorio qué partícula (la de materia o la de antimateria) cae en el agujero negro? En tal caso, la cantidad de materia en el interior del agujero negro que, con el tiempo, es aniquilada por las antipartículas que caen en él se vería compensada por una cantidad igual de partículas que atraviesan el horizonte. Por tanto, el proceso no debería ejercer ningún efecto neto sobre la masa del agujero negro.

Byron Bowman

Responde Polchinski: *Es cierto que los agujeros negros radian la misma cantidad de partículas que de antipartículas. De hecho, eso llevó a Hawking a predecir que, si un agujero negro se formase a partir de una estrella hecha solo de materia, acabaría convirtiendo la mitad de esa materia en antimateria. Sin embargo, también la antimateria tiene masa y energía positivas, por lo que el argumento principal sigue siendo igual de válido.*

CONSERVACIÓN Y PESCA

En «El *maërl*, un bioingeniero amenazado» [Investigación y Ciencia, junio de 2015], las investigadoras del Centro Oceanográfico de Baleares Sandra Mallol, Carmen Barberá y Raquel Goñi exponen las amenazas sobre los fondos de *maërl* relacionadas con la turbidez de las aguas, la extracción de estos organismos para su uso en agricultura, la creciente acidificación de los océanos y las amenazas derivadas de la actividad pesquera, con mención a las modalidades de arrastre de fondo y trasmallo.

No obstante, creo que ha resultado evidente la coexistencia de los fondos coralígenos y de *maërl* (rodolitos) con una explotación pesquera razonable. Así lo han demostrado recientemente los cartografiados del canal de Menorca realizados en el marco del proyecto europeo LIFE+Indemares.

Por otra parte, el artículo afirma que estos fondos pueden encontrarse a profundidades de más de 100 metros. Pero, según el informe de noviembre de 2009 del Proyecto CANAL, «Caracterización del ecosistema demersal y bentónico del Canal de Menorca (Islas Baleares) y su explotación pesquera», del Centro Oceanográfico de Baleares, dichos fondos se distribuyen hasta un máximo de entre 80 y 90 metros de profundidad. El matiz es importante, ya que en el caso de fondos cuyas densidades de *maërl* o coralígeno aconsejan la prohibición de la pesca de arrastre de fondo, dicha prohibición solo se contempla hasta donde se encuentran tales hábitats.

Antoni Garau Coll
Secretario de la Organización de Productores Pesqueros de Mallorca Opmallorcamar

Responden las autoras: *La información batimétrica presentada en el artículo es genérica: se refiere al intervalo de profundidades en que puede hallarse este tipo de comunidad en todo el mundo, por lo que no alude a ninguna zona geográfica concreta. Estos datos pueden encontrarse en el artículo de Michael S. Foster «Rhodoliths: between rocks and soft places»,* Journal of Phycology*, vol. 37, n.º 5, págs. 659-667, octubre de 2001.*

Errata corrige

Como apunta nuestro lector Javier Martínez de Salinas, en la página 42 del artículo **¿Cómo afecta el cambio climático a los vinos?** [Kimberly A. Nicholas; Investigación y Ciencia, julio de 2015] se indican valores erróneos del rendimiento de las cosechas. El rendimiento esperado en el valle Central de California no es de 3 toneladas por hectárea, sino de 30. En el valle de Napa, el dato correcto es 10 toneladas por hectárea, no una.

Estos errores han sido corregidos en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.









LOS TERREMOTOS DEL HIMALAYA (Nepal, *fila de arriba)* podrían fracturar presas y conducir a situaciones desastrosas, como las vistas en la localidad india de Kedernath cuando las lluvias monzónicas de 2013 hicieron que se desbordara un lago (*fila de abajo*).

GEOLOGÍA

El desastre que se cierne sobre las presas del Himalaya

Dos naciones tan pobladas como China e India están construyendo presas en una zona de gran actividad sísmica

A principios de este año, los terremotos de Nepal arrasaron miles de edificios, mataron a más de 8500 personas e hirieron a cientos de miles más. Los temblores, de magnitudes 7,8 y 7,3, al agrietar o dañar además varias centrales hidroeléctricas, subrayaron otro peligro inminente: que revienten presas. Se han construido o se encuentran en alguna fase de su construcción o planificación más de 600 grandes presas en el Himalaya; aunque es una región geológicamente activa, es probable que muchas no estén diseñadas para aguantar los peores terremotos que podrían golpear allí, según sostienen diversos sismólogos e ingenieros de obras públicas. Si cayese alguna, pantanos tan grandes como un lago se verterían corriente abajo sobre pueblos y ciudades. Que se hundiese, por ejemplo, la presa de Tehri, en el Himalaya central, asentada sobre una falla, liberaría una pared de agua de 200 metros de alto que embestiría contra dos ciudades. La inundación afectaría a seis núcleos urbanos, con una población entre todos de dos millones de personas.

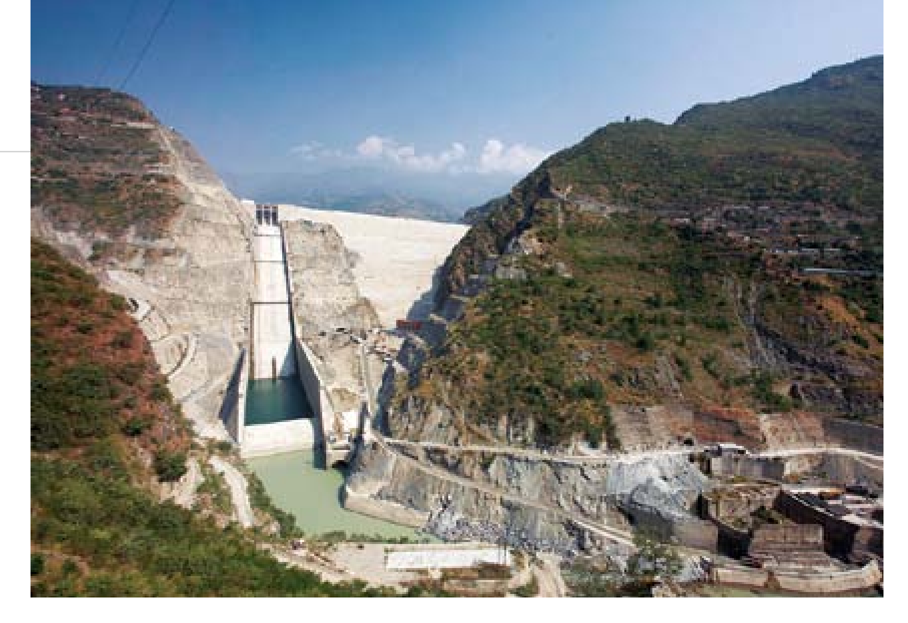
Los modelos sismológicos muestran que es probable que haya más terremotos potentes en el Himalaya en los próximos decenios. El subcontinente indio va empujando por debajo de la meseta tibetana a un paso de alrededor de 1,8 metros por siglo, pero con regularidad se atasca; cuando la obstrucción cede, una parte de la placa tibetana se desplaza de golpe unos metros hacia el sur y libera la energía acumulada con un terremoto. Los terremotos de Nepal desestabilizaron también la región hacia el oeste, observa Laurent Bollinger, sismólogo de la Comisión de Energías Alternativas y Energía Atómica de Francia. Esta desestabilización aumenta la probabilidad de que se produzca pronto un gran terremoto, que, por definición, es uno de magnitud 8 o mayor. Otros estudios indican que los terremotos han liberado solo una parte de la tensión de esa línea de falla, de la que se espera que se reajuste con seísmos de una magnitud igual o mayor. «Si será ahora cuando se rompan, con un 8, o si esperarán doscientos años y cederán entonces con un 8,7, es algo que no

LORENZO MOSCIA, REDUX PICTURES (*arriba a la izquierda*); BULENT DORUK, GETTY IMAGES (*arriba a la derecha*); GETTY IMAGES (*abajo a la izquierda*); CORBIS (*abajo a la derecha*)

puede saberse», comenta Vinod K. Gaur, del Instituto del Cuarto Paradigma, del Consejo de Investigaciones Científicas e Industriales, en Bangalore.

En esas zonas, con semejante actividad sísmica, es precisamente donde se están construyendo cientos de presas o se piensa erigirlas, la mayoría para suministrar energía hidroeléctrica a India o a China. Una presa construida en este furor hidráulico pagado por los Gobiernos debería, como cualquiera de las ya terminadas, resistir las fuertes sacudidas del suelo causadas por un terremoto extremo, apunta Martin Wieland, de la Comisión Internacional de Grandes Presas, grupo de ingenieros que hace recomendaciones relativas a los estándares estructurales. Aunque todas las naciones tienen sus propias normas, India y China mantienen en secreto el diseño de sus presas cuando se quiere inspeccionarlo internacionalmente. Rara vez se permite que ingenieros independientes evalúen la robustez de las estructuras, y cuando consiguen hacerlo, los resultados pueden ser inquietantes.

Según Probe Internacional, organización canadiense que efectúa investigaciones ambientales, los diseñadores de la presa de las Tres Gargantas adoptaron «la interpretación más optimista posible» de la sacudida que se produciría con un terremoto cercano. De modo parecido, nunca se sometió a la presa de Tehri a simulaciones realistas, en opinión de Gaur, que participó en su comité supervisor, y también en la del ingeniero de obras públicas R. N. Iyengar, que fue miembro del Instituto Indio de Ciencias, en Bangalore. Los científicos e ingenieros que trabajan para el Gobierno sostienen que la presa de Tehri sobreviviría a una sacudida de magnitud 8,5, pero los expertos externos no son tan optimistas. Entre cientos de presas, una u otra correrán peligro de reventar cuando llegue el siguiente gran terremoto. Si ocurriese durante los monzones, cuando las presas están llenas, las consecuencias podrían ser catastróficas.



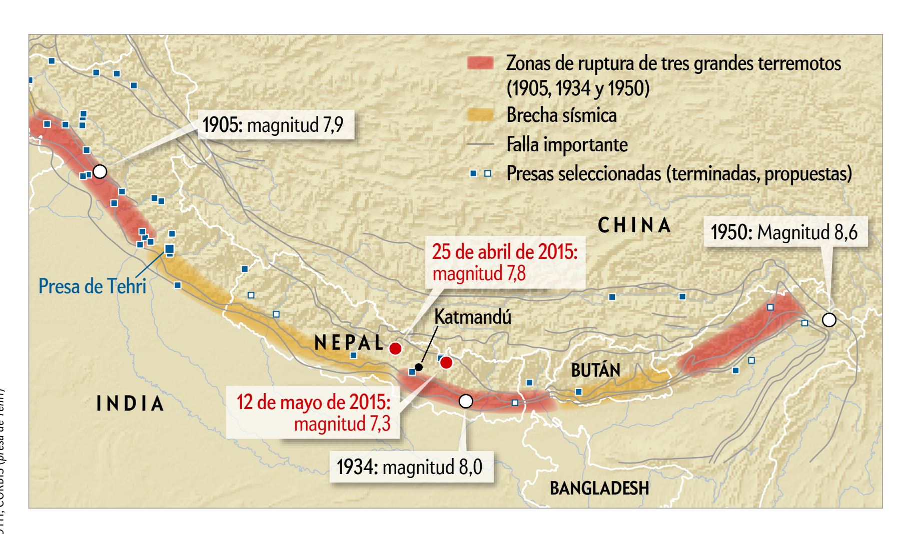
LA PRESA DE TEHRI, en India, retiene al río Bhagirathi, uno de los principales afluentes del Ganges.

La corrupción local complica las cosas. Gracias a ella, los constructores usan impunemente materiales de calidad inferior a la exigida o incumplen los parámetros obligatorios. Según un estudio que publicó *Nature* en 2011, una mayoría abrumadora de las muertes causadas por el derrumbe de edificios en terremotos se produjo en países corruptos. Más aún, Transparencia Internacional, organización no gubernamental que pone el foco en la corrupción, considera que las obras públicas de construcción son uno de los ramos más propensos al cohecho, y las presas preocupan en especial. Escándalos relativos a proyectos de presas han perturbado tanto a India como a China, hasta el punto de que el ex primer ministro chino Zhu Rongji acuñó la gráfica expresión «construcción de tofu» para referirse a una presa defectuosa.

Un puñado de científicos, bien conscientes del peligro oculto en el Himalaya, encabeza la defensa de que haya evaluaciones realistas y sin tapujos, encaminadas a proteger a la población de la zona. No están teniendo mucho éxito. El Tribunal Supremo de la India, al dictaminar sobre una demanda interpuesta por ecologistas contra la presa de Tehri, se puso de parte de los científicos del Gobierno y desestimó las dudas sobre la seguridad de la misma. Y en 2012 el sismólogo Roger Bilham, de la Universidad de Colorado en Boulder, fue deportado desde el aeropuerto de Nueva Delhi, en parte, dice, por su predicción, no bien recibida, de que en el Himalaya podría haber un terremoto de magnitud 9. Bilham mantiene que el Gobierno indio desanima desde entonces las colaboraciones en sismología con extranjeros.

Por ahora, todo lo que las partes interesadas pueden hacer es llamar la atención sobre el problema. «La luz del sol es el mejor desinfectante» —dice Peter Bosshard, de Internacional Rivers, en Berkeley, California—. «Sin el control público, se necesitará algo más que luz solar: el próximo gran terremoto que se produzca en esa zona quizá se convierta en un tsunami artificial.»

—Madhusree Mukerjee



LOS SISMÓLOGOS esperan que haya futuros temblores de magnitud 8 o mayor en el Himalaya, donde se encuentran cientos de presas; se muestra aquí la localización de algunas.

HANS GEORG ROTH, CORBIS (*presa de Tehri*)

SISTEMA SOLAR

La mugre marrón de Europa

Una sustancia oscura observada en la superficie del satélite joviano sugiere la existencia de un mar salado

Hace tiempo que los expertos creen que Europa, la luna de Júpiter, podría albergar vida en sus océanos subsuperficiales. Pero otro de los secretos de este mundo helado se encuentra bien a la vista: la misteriosa «mugre marrón» que rellena buena parte de las fisuras y cráteres que surcan la superficie. «Ese es nuestro mejor término para denominarla: mugre marrón (*brown gunk*)», señala Curt Niebur, de la NASA. En un congreso reciente, el experto argumentó que lo más probable era que esa sustancia desconocida hubiese llegado a la superficie del satélite mediante erupciones de agua procedente de las profundidades. «Si averiguásemos qué es, sabríamos qué hay en los océanos de Europa», apunta el investigador. Así pues, conocer la composición de la mugre marrón resultaría de gran ayuda para evaluar la posibilidad de que Europa albergue vida.

Ahora, Kevin Hand y Robert Carlson, planetólogos de la NASA, parece que han dado con una pista: la misteriosa sustancia bien podría ser sal, idéntica a la de los océanos terrestres pero «cocinada» por la radiación. Los investigadores llegaron a esa conclusión tras simular el duro entorno del satélite joviano en el laboratorio. Al introducir sal común en una cámara de vacío criogénica bañada con haces de electrones, observaron que las muestras tomaban un color pardoamarillento y desarrollaban rasgos espectroscópicos similares a los observados en la mugre marrón de Europa. Los resultados del trabajo aparecieron publicados el pasado mes de mayo en *Geophysical Research Letters*.

Si la enigmática sustancia resultase ser sal irradiada, ello significaría que el océano subsuperficial de Europa se encuentra, al igual que el de la Tierra, en contacto directo con la roca y enriquecido con minerales potencialmente útiles para la vida. En el experimento, la sal se tornaba más oscura cuanto más tiempo permanecía expuesta a las condiciones de la cámara. Esta propiedad podría ayudar a localizar las zonas de Europa en que el agua emerge a la superficie, ya que en ellas la mugre marrón presentaría una tonalidad más clara. En todo caso, no falta mucho para que la NASA comience a explorar el satélite: la pasada primavera, la agencia anunció que planea enviar una misión para la década de 2020. —*Lee Billings*

GRIETAS Y CRESTAS de color oscuro en la superficie de Europa.



FÍSICA

La sala con el campo magnético más débil de la Tierra

Cinco cuestiones que podría resolver

Rara vez se festeja que algo sea «lo más débil» de su género. Este verano, sin embargo, han comenzado los experimentos en una sala que puede presumir de albergar el campo magnético más débil del planeta. Construida en la Universidad Técnica de Múnich, la estancia consigue reducir la intensidad del campo magnético ambiente hasta diez veces más que cualquier otra estructura fabricada antes. La actividad magnética que se registra en su interior es incluso menor que la que reina en el vasto vacío interplanetario. El blindaje de la cámara consta de varias capas de metales muy magnetizables, lo que evita que los campos penetren en el interior. Esas condiciones permiten llevar a cabo experimentos ultraprecisos sin apenas sufrir las interferencias causadas por la Tierra, los dispositivos electrónicos o el cuerpo humano, entre otros factores. El particular «silencio» de esta sala ofrece una oportunidad única para investigar cuestiones de todo tipo en física, biología y medicina. —*Sarah Lewin*



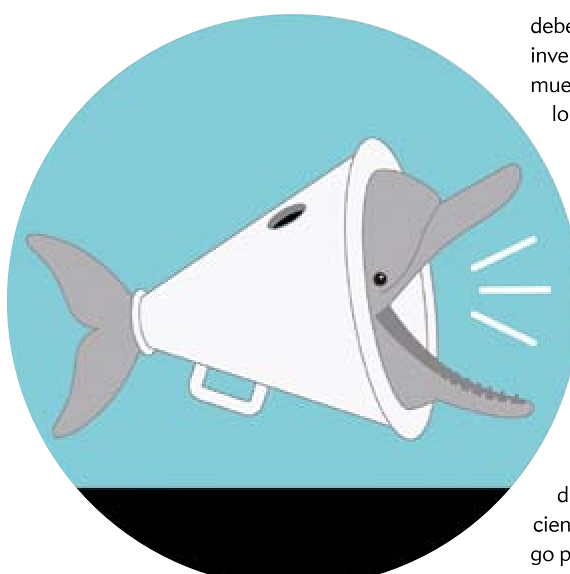
1 ¿Por qué en el universo hay más materia que antimateria? Los físicos de Múnich intentarán determinar si el neutrón posee un pequeño momento dipolar eléctrico; es decir, si la carga eléctrica de sus quarks se distribuye o no de manera completamente uniforme. La observación de una asimetría de este tipo en una partícula subatómica podría ayudar a entender qué proceso inclinó la balanza del lado de la materia al inicio del universo.

2 ¿Existen los monopolos magnéticos? Si en el mundo hay partículas magnéticas con un solo polo, estas podrían atravesar el blindaje de la sala. Sin interferencias magnéticas de otro tipo, sería posible detectar su presencia.

3 ¿De qué está hecha la materia oscura? Los investigadores planean emplear la sala para buscar partículas de materia oscura de tipo axión. En caso de existir, estas podrían interaccionar muy débilmente con algunos átomos.

4 ¿Cómo emplean los animales los campos magnéticos para orientarse? Al criar organismos en un entorno con muy poca actividad magnética, tal vez sea posible averiguar si la orientación magnética constituye un rasgo aprendido o innato.

5 Magnetismo y salud humana. Un entorno sin apenas interferencias magnéticas permitiría llevar a cabo pruebas diagnósticas de gran precisión. Por ejemplo, distinguir el campo magnético del corazón de una mujer embarazada y el de su feto para buscar irregularidades.



COMPORTAMIENTO ANIMAL

¿Alguien me escucha?

Los delfines chasquean con fuerza para ser oídos entre el rumor de las embarcaciones, con el consiguiente gasto energético

¡Clic! Clic-clic-clic-clic. Buffff. ¡Cliiiiiiiiic! Un delfín mular intenta comunicarse con colegas cercanos, pero nadie oye su llamada. Hay demasiadas embarcaciones en el agua, y el ruido resulta ensordecedor. Si quieren ser oídos entre tanto alboroto, las ballenas y los delfines han de alzar el volumen de la voz, cosa que consiguen modificando la frecuencia, la amplitud o la duración de las vocalizaciones o, sencillamente, repitiendo una y otra vez las llamadas.

Por desgracia, esa alteración acústica mina su salud. Marla M. Holt, bióloga de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano, y sus colaboradores lo comprobaron al estudiar un par de delfines mulares del laboratorio marino Joseph M. Long, de la Universidad de California en Santa Cruz. La pareja fue adiestrada para emitir una vocalización de bajo tono y amplitud, así como una llamada de alta amplitud, diez decibelios más potente. Los investigadores analizaron el consumo de oxígeno de los delfines en el curso de las dos llamadas y verificaron que los chasquidos más potentes requerían más oxígeno.

El equipo combinó esos hallazgos con los datos de delfines en libertad para calcular el número de calorías adicionales que deberían ingerir para compensar el esfuerzo invertido en las llamadas. Los cálculos demuestran que los animales necesitan dos calorías más por cada dos minutos de charla a viva voz para ser oídos por encima del rumor de los buques. Este coste metabólico puede parecer pequeño, pero se acumula con el tiempo. «Para sobrevivir y procrear, uno tiene que estar seguro de que dispondrá cada día de las calorías necesarias para sustentar esas actividades», explica Holt. Y los animales que viven en entornos ruidosos donde el alimento escasea y que dependen del sonido para la comunicación, la caza y la reproducción tal vez no hallen el pescado suficiente para compensar la diferencia. El riesgo para la salud es aún más grave en el caso de los individuos juveniles y de las hembras con crías, ya que por su condición precisan de un mayor aporte nutritivo. Los resultados se publicaron la pasada primavera en *Journal of Experimental Biology*.

El ruido subacuático generado por la actividad humana, ya sea por el giro de las hélices, el ronroneo de los motores, el tintineo de las obras de construcción o las detonaciones para la exploración sísmica, obligan a alzar la voz a los odontocetos. Otras investigaciones demuestran que las ballenas y los delfines emergen, saltan fuera del agua y coletean con más frecuencia cuando cerca de ellos rondan embarcaciones, actitudes que incrementan aún más el consumo de energía. El sónar militar también trastoca el oído de los cetáceos y altera su comportamiento de buceo, y con toda probabilidad los hace enfermar y los desorienta, abocándolos a quedar varados en muchos casos. El siguiente paso para Holt y sus colaboradores consistirá en estudiar actuaciones concretas para mitigar los perjuicios del ruido antrópico en los delfines y otra fauna marina, tales como exigir a los buques que ralenticen los motores antes de su arribada a puerto o mantener los barcos de observación de cetáceos a una distancia prudencial de los individuos avistados.

Cuanto más fuerte chasquean los delfines, más oxígeno consumen

¿Acaso no lo sabemos todos? Interrumpir una conversación es de mala educación.

—Jason G. Goldman

THOMAS FUCHS (*ilustración*); DEUTSCHES MUSEUM (*exposición*)

AGENDA

EXPOSICIONES

La vida al límite
Museo Americano de Historia Natural
Nueva York
www.amnh.org

Diseña tu futuro
Museo de la Ciencia
Londres
www.sciencemuseum.org.uk

Bienvenidos al Antropoceno. La Tierra en nuestras manos
Deutsches Museum
Múnich
www.deutsches-museum.de



Muuultiplicaos
Esposición sobre acuicultura
Aquarium Finisterrae
La Coruña
http://mc2coruna.org/aquarium

La mujer guanche. La fuerza de lo invisible
Museo de la Naturaleza y el Hombre
Santa Cruz de Tenerife
www.museosdetenerife.org

OTROS

Del 26 al 28 de agosto - Curso
Patrimonio geológico, geoparques y geoturismo
Castillo de Aínsa (Huesca)
www.geoparquepirineos.com

27 y 28 de agosto - Taller
Cómo se escribe y se publica un artículo de investigación
Palacio Miramar
San Sebastián
http://udaikastaroak-dev.i2basque.es

29 de agosto - Actividad familiar
Hoy nos convertimos en neolíticos
Parque Neolítico de la Draga
Bañolas (Gerona)
www.museusdebanyoles.cat

Sábados y domingos - Taller
BrainGames pon a prueba tu cerebro
Casa de la Ciencia, Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es

BIOLOGÍA VEGETAL

Cultivos biotecnológicos más resistentes a la sequía

Nuevos hallazgos sobre la acción del ácido abscísico, una hormona clave en la respuesta de las plantas a la escasez de agua, abren nuevas vías de mejora vegetal

PEDRO L. RODRÍGUEZ EGEA

En la inquietante película *El incidente*, del director indio M. Night Shyamalan, se nos muestra un mundo vegetal que reacciona de una manera mortífera ante los humanos. Los bosques y praderas se convierten en sensibles detectores de grupos de personas y liberan algún tipo de neurotoxina que los acaba matando.

Afortunadamente para nosotros, estos episodios solo pueden ocurrir en la imaginación del brillante director. No obstante, sí es cierto que las plantas poseen un elaborado sistema de respuesta ante el estrés ambiental, sea causado por seres vivos (como herbívoros, insectos y patógenos) o por diversas situaciones que inciden negativamente sobre su crecimiento y desarrollo (sequía, salinidad, fluctuaciones de temperatura). Es fácil entender que tal reacción resulte necesaria para la supervivencia de las plantas y, por tanto, para su éxito evolutivo. Estas, a diferencia de los animales, son organismos sésiles, por lo que muestran una especial sensibilidad ante circunstancias adversas de las que no pueden escapar. De hecho, la aparición de una hormona vegetal denominada ácido abscísico (ABA) fue decisiva para que los primeros vegetales no acuáticos pudieran colonizar el medio terrestre. Hoy esa hormona desempeña una función crucial en la regulación del consumo de agua y en la reacción fisiológica de la planta ante la sequía.

La escasez de agua limita gravemente la producción vegetal, que puede disminuir entre un 50 y un 80 por ciento a causa de ella y otros factores de estrés. Los efectos negativos repercuten en particular sobre la agricultura, que representa la base de la alimentación animal y el sustento de la creciente población del planeta. Sin duda, se requerirá un esfuerzo vigoroso para generar nuevas variedades vegetales que exhiban una mayor eficiencia en el uso del agua y tolerancia a la sequía, bien a través de métodos clásicos de mejora genética, o bien mediante técnicas moleculares de ingeniería genética. Mientras que la mejora genética se basa en el cruce de especies relacionadas y selección de los caracteres deseados en la descendencia, la ingeniería genética permite introducir rasgos de interés en una especie a partir del conocimiento de la función de los genes. Ambas disciplinas serán necesarias para una nueva revolución verde que contribuya a mantener el rendimiento de los cultivos en situaciones de estrés ambiental.

La función de la hormona ABA

El mecanismo del que disponen las plantas para responder al estrés ambiental, especialmente en condiciones de sequía, se basa en la acción de la hormona ABA. Se trata de un compuesto orgánico sintetizado por la planta y transportado a varias regiones de esta, donde ejerce potentes efectos fisiológicos a muy bajas dosis. Recientes avances en la investigación básica sobre el ABA permiten plantear estrategias biotecnológicas para mejorar la resistencia de las plantas a la sequía.

El trabajo de nuestro grupo se centra precisamente en desentrañar las bases de

RESPUESTA DE LA PLANTA ANTE LA FALTA DE AGUA

En situaciones de sequía, la planta activa una respuesta coordinada por una hormona vegetal, el ácido abscísico (ABA), que le permite resistir al estrés hídrico. Cuando el agua escasea, la concentración de ABA aumenta, una señal que es percibida por receptores específicos de la hormona en las células vegetales. Ello pone en marcha una serie de reacciones moleculares (*círculos verdes*) que desembocan en distintas adaptaciones celulares y fisiológicas para evitar la deshidratación y el daño en los tejidos vegetales.

ABA
Receptor PYR/PYL
La sequía estimula la síntesis de ABA, que se une a su receptor
Se inhibe la fosfatasa PP2C
Se liberan las cinasas SnRK2
Se activan factores de transcripción
Se cierran los estomas de la epidermis vegetal para evitar la transpiración
Se estimula la división celular en el ápice de la raíz, que se alarga en busca de agua
Se sintetizan solutos y proteínas que protegen los tejidos vegetales de la deshidratación

ILUSTRACIONES CORTESÍA DEL AUTOR

la respuesta vegetal ante el estrés hídrico. En concreto, investigamos el modo en que las plantas orquestan la compleja red de reacciones, coordinadas por el ABA, que tienen por objeto frenar la pérdida de agua durante la sequía, promover su absorción y proteger los tejidos vegetales de los efectos dañinos de la deshidratación.

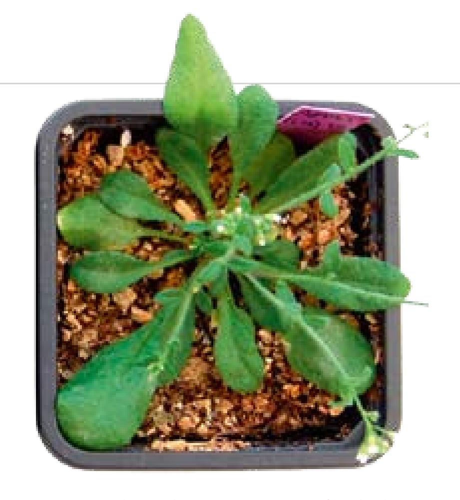
Por un lado, el ABA regula la transpiración, la pérdida de agua que se produce a través de los estomas (unos poros de la superficie vegetal que controlan el intercambio de gases, como el dióxido de carbono, el oxígeno y el vapor de agua, con el entorno). La molécula controla la apertura de los estomas; permite que se cierren en períodos de sequía y se reduce de este modo la transpiración.

Por otro lado, el ABA resulta fundamental para mantener el crecimiento de la raíz principal cuando el nivel hídrico de la planta desciende, o para percibir en qué zonas del suelo sigue existiendo humedad. Ello aumenta las posibilidades de obtención de agua, ya que la planta puede acceder a zonas más profundas del suelo y, además, dispone de una mayor superficie radicular con capacidad de absorción.

Asimismo, el ABA evita la deshidratación de los tejidos y protege las estructuras y componentes de las células vegetales de los daños asociados a ella. En las células regula la producción de dehidrinas, unas proteínas que unen y retienen agua y evitan su pérdida de los tejidos. También dirige la síntesis de metabolitos que, al retener agua por efecto osmótico, protegen la estructura de las membranas celulares y de las enzimas (catalizadores biológicos que resultan cruciales para el metabolismo celular). Y, por último, promueve la desintoxicación (esto es, la bioinactivación y eliminación) de especies oxidantes derivadas del oxígeno, las cuales se originan como consecuencia del estrés hídrico.

Después de décadas de investigación, entendemos ahora las bases moleculares de la acción del ABA y conocemos los entresijos de su acción al nivel más detallado posible para la ciencia actual. Un paso decisivo ha sido el descubrimiento de los receptores de la hormona ABA, denominados PYR/PYL (siglas inglesas de proteínas de «resistencia a la pirabactina/parecidas a PYR»; la pirabactina es el compuesto sintético con el que se identificaron los receptores). En ellos encaja como una llave en la cerradura la molécula ABA, que abre así la puerta de la respuesta vegetal a la sequía.

ILUSTRACIONES CORTESÍA DEL AUTOR





EN LA ESPECIE *ARABIDOPSIS THALIANA* se ha comprobado que, si se refuerza la acción de la hormona ABA (*izquierda*), las plantas resisten mejor la sequía que si no se realiza intervención alguna (*derecha*).

Cuando los niveles de la hormona ABA aumentan (mediante la síntesis *de novo* o su liberación desde almacenes celulares), la señal es percibida por los receptores PYR/PYL, que apagan la función de proteínas fosfatasas de tipo 2C (PP2C). Tal inhibición permite que se activen cinasas de tipo SnRK2, unas proteínas que fosforilan diferentes dianas en la célula, lo cual pone en marcha la respuesta de la planta ante la situación de estrés.

De este modo, el mecanismo de acción de los receptores PYR/PYL se basa en la inhibición de PP2C. En condiciones normales de ausencia de estrés, esta enzima impide el despliegue del costoso arsenal descrito anteriormente. Por el contrario, cuando hay escasez de agua, la percepción del ABA por sus receptores lleva a la eliminación del freno fisiológico a la respuesta hormonal.

Cultivos más resistentes

El conocimiento obtenido tiene enormes implicaciones prácticas para la mejora de la respuesta vegetal ante la sequía. Así, es posible modificar los receptores de la hormona (bien aumentando la expresión de los receptores o estimulando su capacidad de fijar ABA) para reforzar la respuesta de la planta, de modo que esta se adapte con mayor rapidez y eficacia ante una situación de estrés hídrico. También se han diseñado moléculas sintéticas que activan el receptor y que pueden ser aplicadas mediante pulverización ante la sequía.

De hecho, resulta bastante sencillo generar en el laboratorio plantas que consumen menos agua y que toleran o resisten episodios de sequía. Nuestro grupo lo ha logrado, en concreto, con *Arabidopsis thaliana*, una planta modelo para la que existe un amplio abanico de herramientas de investigación. Lo ha conseguido mediante la inactivación de las PP2C o el refuerzo de la acción de los receptores. Puesto que la ruta de señalización del ABA se halla presente en todo el universo vegetal, el conocimiento generado en *Arabidopsis* puede ser implementado en plantas de cosecha en la medida en que dispongamos de información genómica sobre ellas. Ello nos permitirá identificar los genes clave de la señalización del ABA y actuar sobre ellos.

Esta vía nos permitiría generar cultivos biotecnológicos (los que aprovechan los avances de la biotecnología agrícola) para mejorar la resistencia a la sequía del arroz u otros cereales, plantas que sirven de sustento básico a la población del planeta.

—Pedro L. Rodríguez Egea
Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas
Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universidad Politécnica de Valencia

PARA SABER MÁS

Abscisic acid: Emergence of a core signaling network. S. R. Cutler et al. en *Annual Review of Plant Biology*, vol. 61, págs. 651-679, 2010.

C2-domain abscisic acid-related proteins mediate the interaction of PYR/PYL/RCAR abscisic acid receptors with the plasma membrane and regulate abscisic acid sensitivity in *Arabidopsis*. L. Rodríguez et al. en *The Plant Cell*, vol. 22, n.º 12, págs. 4802-4820, diciembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las hormonas vegetales. A. Granell y J. Carbonell en *IyC*, abril de 1995.

GENÉTICA

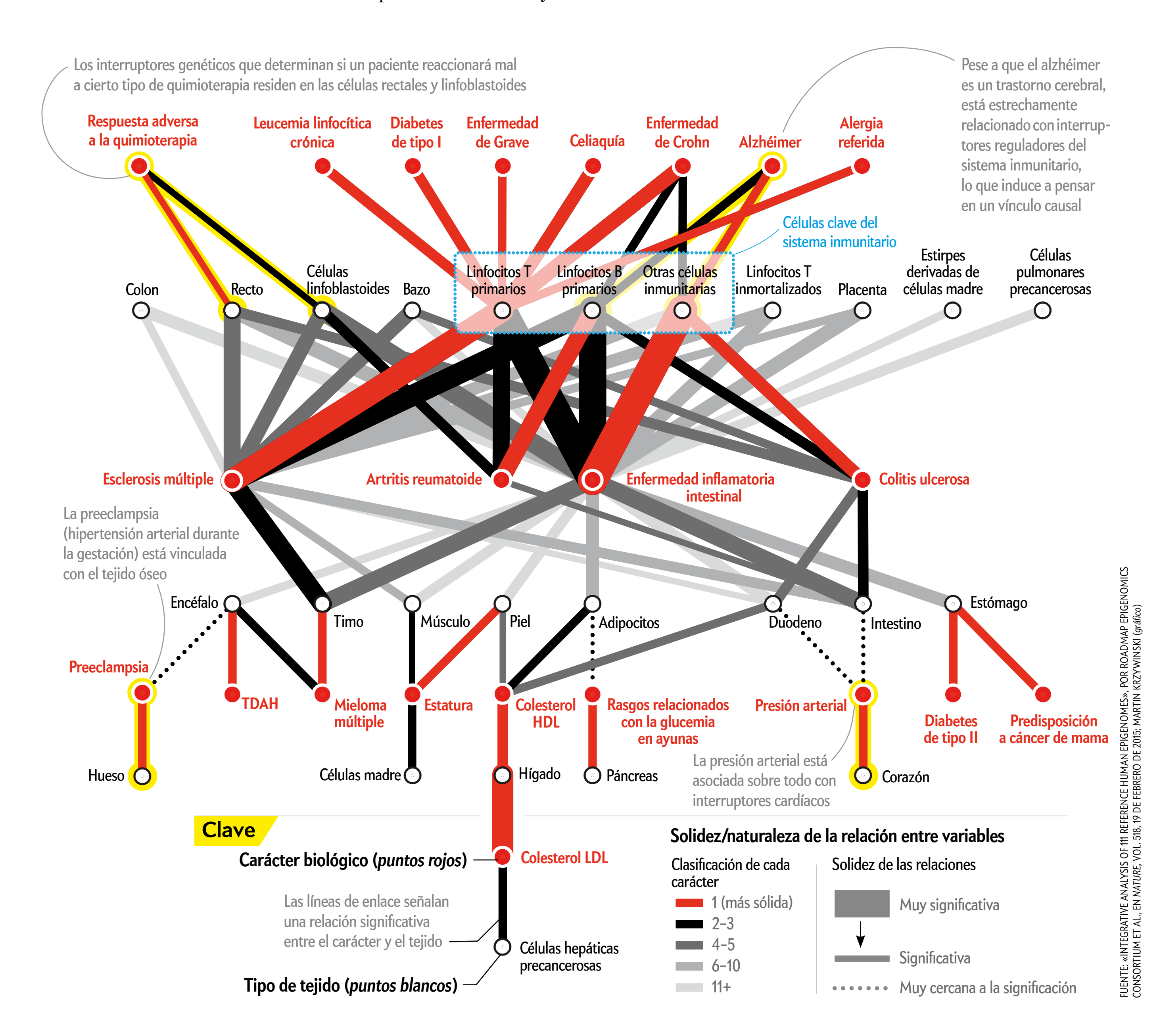
Mapa de la regulación epigenética

Una compleja red de interruptores controla la relación entre genes, caracteres y enfermedad

DINA FINE MARON

Nuestros genes no tienen la última palabra acerca del riesgo de contraer una enfermedad o de otros caracteres. Su expresión se halla regulada por infinidad de interruptores de control, a menudo accionados por la alimentación materna, la exposición a sustancias tóxicas y otros muchos factores ambientales. Para comenzar a entender esta complejísima epigenética se han analizado 150.000 millones de bits de datos genómicos procedentes de más de un centenar de tejidos y células humanas (cerebrales, cardíacas, óseas, etcétera).

El primer paso consistió en localizar los interruptores mediante el análisis de las variaciones específicas en el ADN y en las proteínas que este codifica. A continuación, los investigadores contrastaron los datos de individuos con rasgos biológicos concretos con los de otros que carecían de ellos para determinar las asociaciones entre los caracteres y los interruptores. El resultado es un mapa que enlaza las enfermedades complejas y los caracteres (*círculos rojos*) con la ubicación en el cuerpo de los interruptores epigenéticos mejor contrastados (*puntos blancos*); el grosor de las líneas indica la robustez del vínculo. Este diagrama será de gran ayuda para descubrir la base molecular de la variación y de las enfermedades humanas, y para el desarrollo de nuevos medicamentos.



FUENTE: «INTEGRATIVE ANALYSIS OF 111 REFERENCE HUMAN EPIGENOMES», POR ROADMAP EPIGENOMICS CONSORTIUM ET AL., EN *NATURE*, VOL. 518, 19 DE FEBRERO DE 2015; MARTIN KRZYWINSKI (*gráfico*)

CALENTAMIENTO GLOBAL

Reservas intocables

¿Qué fracción de los combustibles fósiles que aún quedan podremos quemar a medio plazo sin agravar el calentamiento global? Un modelo facilita la respuesta y muestra dónde se hallan las reservas a las que habría que renunciar

MICHAEL JAKOB Y JÉRÔME HILAIRE

Las emisiones acumuladas de dióxido de carbono no deberían superar la horquilla de entre 870 y 1240 gigatoneladas entre 2011 y 2050 si queremos concedernos una oportunidad razonable de limitar el calentamiento global a 2 grados Celsius por encima de los valores preindustriales. Sin embargo, se estima que el carbono contenido en las reservas de combustibles fósiles del planeta equivale a unas 11.000 gigatoneladas de CO_2. Por tanto, una política climática ambiciosa supondría dejar de explotar un gran volumen de las reservas del planeta.

Tras modelizar un amplio abanico de situaciones basadas en la adopción de las políticas climáticas de menor coste, Christophe McGlade y Paul Ekins, de la Escuela Universitaria de Londres, han cuantificado la distribución regional de las reservas de combustibles fósiles que no deberían quemarse entre 2010 y 2050. Los resultados fueron publicados a principios de año en la revista *Nature*.

Algunas investigaciones previas ya habían analizado las repercusiones globales a largo plazo que tendría la mitigación del cambio climático en los mercados de combustibles fósiles. La novedad del estudio de McGlade y Ekins reside en que su modelo utiliza una detallada representación regional de las reservas basada en fuentes de datos sólidas.

En cada una de las 16 regiones consideradas, los combustibles fósiles se dividen en 21 categorías que incluyen varios tipos de carbón, petróleo y gas. Cada una se define según ciertas características clave, como los recursos recuperables, los costes de producción y comercialización, así como el declive natural de la producción (es decir, la caída que se observaría en ausencia de una inversión mayor).

Ese enfoque ha permitido a los autores establecer diferencias entre las reservas de combustibles fósiles que no deberían quemarse. Alrededor del 80, 50 y 30 por ciento de las reservas de carbón, gas y petróleo, respectivamente, tendrían que quedar en el subsuelo si pretendemos que el aumento de la temperatura media global no rebase los 2 ºC. La desigual distribución del carbón que no debe quemarse implica serias consecuencias para los propietarios de combustibles fósiles.

Diferencias regionales

Oriente Medio, que posee el grueso de las reservas de petróleo, debería dejar bajo tierra cerca del 40 por ciento de ellas, lo que equivale a ocho años de producción global al ritmo actual (87 millones de barriles al día). De igual modo, los países con grandes reservas de carbón afrontarían serios retos. China e India se verían obligadas a renunciar al 66 por ciento de sus reservas, mientras que África debería abandonar el 85 por ciento. Estados Unidos, Australia y los países de la antigua Unión Soviética tendrían que renunciar a más del 90 por ciento de sus reservas de carbón, una medida que chocaría frontalmente con el renacimiento que dicho combustible está experimentando en numerosas regiones.

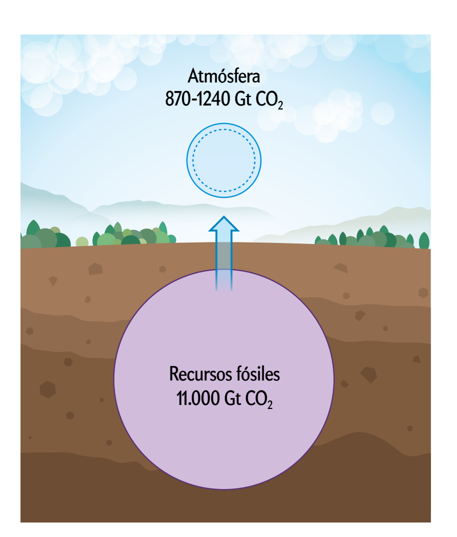
Las centrales eléctricas de gas emiten menos CO_2 por unidad de energía producida que las de carbón. Y el gas natural «no tradicional», como el de lutita, se ha propuesto como puente en la transición global hacia fuentes renovables (si bien este aspecto ha sido puesto en duda hace poco). Ante el actual auge en la producción de gas de lutita en Estados Unidos, otras regiones, como China, India, África y Oriente Medio, están tratando de desbloquear sus cuantiosos recursos o aumentar la producción ya existente.

Sin embargo, el análisis de McGlade y Ekins indica, por una parte, que tanto África como Oriente Medio tendrían que dejar enterradas la totalidad de sus fuentes de gas no tradicionales y, por otra, que China e India solo podrían explotar el 10 por ciento de sus recursos totales (entre ellos, cantidades sustanciales de metano contenido en yacimientos de carbón).

Las cifras de McGlade y Ekins para el período 2010-2050 señalan que el volumen de combustibles fósiles al que debería renunciarse depende ligeramente de la disponibilidad de una técnica de captura y secuestro de carbono. Su ausencia implicaría una extracción aún menor de carbón, gas y petróleo, así como una preferencia del gas natural sobre el carbón, dado que el primero emite menos CO_2 que el segundo por unidad de energía producida. La implantación de técnicas para sustraer CO_2 permitiría extraer más combustibles fósiles después de 2050, pero la futura disponibilidad de estas técnicas, hoy incipientes, es aún incierta.

De los números a la política

El análisis de los autores recuerda a los llamamientos de los últimos años para promover la desinversión en combustibles fósiles. Estos han surgido de distintas organizaciones en un intento de influir sobre los inversores institucionales, como los fondos de pensiones, y persuadirlos de que miren hacia las energías limpias. Las mismas organizaciones también han advertido de la posibilidad de que la «burbuja del carbono» explote



THINKSTOCK/BZH22

¿CUÁNTO QUEDA? La explotación de todas las reservas de combustibles fósiles sobrecargaría la atmósfera. Se calcula que su quema supondría la emisión de 11.000 gigatoneladas (Gt) de CO_2. Pero, para evitar un calentamiento por encima de los 2 ºC con respecto a los valores preindustriales, las emisiones acumuladas entre 2011 y 2050 no deberían superar la horquilla de 870-1240 gigatoneladas.

si se materializa una política climática ambiciosa, pues ello devaluaría de manera considerable las reservas fósiles, hoy valoradas en 27 billones de dólares.

Así pues, las compañías de combustibles fósiles deberían plantearse si desean continuar invirtiendo en exploración y tratamiento de petróleo, gas y carbón, o arriesgarse a perder miles de millones en activos varados. Dada la influencia política del sector, los responsables políticos habrán de adoptar medidas que gocen de la aceptación de los accionistas.

Un aspecto fundamental del trabajo de McGlade y Ekins es que pone de relieve los problemas de redistribución a los que se enfrenta la política climática: imponer un límite al uso de combustibles fósiles equivale a transferir beneficios («rentas») de los propietarios de los recursos hacia aquellos que obtengan el derecho a explotar ciertas reservas. En consecuencia, el éxito de la política climática dependerá en gran medida de si dicha «renta climática» puede repartirse de un modo equitativo que asegure, además, una compensación a los propietarios de los recursos.

Ello podría lograrse con una asignación apropiada de derechos de emisión en un mercado internacional de carbono, o mediante pagos a través del Fondo Verde para el Clima, creado por las Naciones Unidas para ayudar a los países en vías de desarrollo a adoptar prácticas contra el calentamiento global. Otras propuestas incluyen aliviar la deuda pública a cambio de reducir las emisiones, o destinar parte de la renta climática a financiar servicios básicos como agua, saneamiento y electricidad.

Sin embargo, dada la función fundamental que cumple la energía en el desarrollo económico, ¿cómo convencer a un país de que renuncie a sus reservas de combustible si percibe que la medida pone en peligro un objetivo político tan primordial como la reducción de la pobreza? En la cumbre de dirigentes políticos de Estados Unidos y África celebrada el año pasado, Sospeter Muhongo, ministro de energía de Tanzania, afirmó: «En África no deberíamos participar en el debate sobre si debemos usar carbón o no. En Tanzania, mi país, vamos a explotar nuestros recursos, puesto que nuestras reservas superan los 5000 millones de toneladas».

Solo un acuerdo global que compense a los perdedores y se perciba como equitativo por todas las partes podrá imponer límites estrictos al uso de combustibles fósiles a largo plazo. Al identificar los potenciales ganadores y perdedores de un escenario semejante, los análisis como el de McGlade y Ekins acercan la posibilidad de alcanzar un pacto de tales características y ayudarán a tomar medidas a corto plazo que allanen el camino.

—Michael Jakob y Jérôme Hilaire
Instituto para la Investigación del Impacto Climático
Potsdam

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 517, págs. 150-152, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

PARA SABER MÁS

Unburnable carbon 2013: Wasted capital and stranded assets. Carbon Tracker y Grantham Institute. **www.carbontracker.org/report/wasted-capital-and-stranded-assets, 2013**.
Feasible mitigation actions in developing countries. M. Jakob et al. en *Nature Climate Change*, vol. 4, págs. 961-968, 2014.
The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 ºC. Christophe McGlade y Paul Ekins en *Nature*, vol. 517, págs. 187-190, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los mercados del carbono. David G. Victor y Danny Cullenward en *IyC*, febrero de 2008.
Es hora de abandonar el objetivo de los 2 ºC. David G. Victor y Charles F. Kennel en *IyC*, marzo de 2015.

ETNOBOTÁNICA

Los beneficios del conocimiento tradicional sobre las plantas

Un estudio sobre dos grupos étnicos balcánicos demuestra que el conocimiento tradicional sobre los recursos vegetales locales ayuda a sobrellevar los períodos de escasez y promueve la conservación de la biodiversidad

MANUEL PARDO DE SANTAYANA Y MANUEL J. MACÍA

Para que los distintos grupos humanos puedan seguir explotando de forma sostenible los ecosistemas que habitan, es esencial comprender el modo en que obtienen, manejan y perciben sus recursos locales. El estudio de estas complejas interacciones entre las personas y las plantas es el objetivo de la etnobotánica, una disciplina integradora multidisciplinar que se basa principalmente en métodos tomados de la botánica y la antropología.

La mayoría de las investigaciones en etnobotánica demuestran que el conocimiento tradicional sobre los recursos alimentarios y medicinales locales está sufriendo un declive alarmante. Este fenómeno resulta especialmente acuciante en Europa. Sin embargo, en un artículo publicado en *Nature Plants*, Cassandra L. Quave, de la Universidad Emory (EE.UU.), y Andrea Pieroni, de la italiana Universidad de Ciencias Gastronómicas, sugieren que las plantas silvestres siguen desempeñando un papel muy importante para las comunidades nativas de las montañas de Kukës, una de las regiones más pobres de Albania. Sus resultados también demuestran que la conservación del conocimiento tradicional se halla íntimamente ligada a la de la biodiversidad.

Las montañas de Kukës se encuentran en los Balcanes, una región de gran diversidad cultural y biológica que ha sufrido drásticos cambios políticos y económicos en las tres últimas décadas. Quave y Pieroni han estudiado comunidades rurales de dos grupos étnicos islámicos, con una cultura y lengua diferentes (goranis y albanos), que, si bien comparten un mismo ambiente y han sufrido condiciones económicas similares, se han mantenido bastante aislados entre sí. Los dos grupos usan las plantas silvestres de manera distinta, por lo que su estudio permite analizar la influencia de los factores cul-

turales sobre las prácticas médicas y alimentarias, y finalmente sobre la propia supervivencia de las etnias.

Entre las técnicas de análisis cuantitativo empleadas, los autores han diseñado una herramienta simple e innovadora que permite comparar similitudes y diferencias en el uso de las plantas por ambos grupos. Han encontrado diferencias en las especies de plantas empleadas con fines medicinales. Una explicación verosímil de este fenómeno es que la difusión de los conocimientos relacionados con la salud requiere un nivel alto de afinidad y confianza en aquel que lo recomienda. La salud es un asunto muy delicado y la gente acepta sobre todo las recomendaciones de parientes o amigos cercanos del propio grupo étnico. Además, muchos remedios tradicionales poseen un importante componente simbólico y los mecanismos por los cuales se los considera efectivos pueden depender, total o parcialmente, de su significado cultural.

Quave y Pieroni han hallado solo dos plantas de uso generalizado tanto por los goranis como por los albanos. Se trata de dos especies comestibles: la ortiga (*Urtica dioica* L.) y la rosa silvestre (*Rosa canina* L.). La similitud entre las plantas usadas en alimentación es mayor que entre las usadas con fines medicinales. Los autores piensan que ello se debe a la importancia de las plantas silvestres comestibles para la seguridad alimentaria. El amplio saber popular sobre estas opera como un reservorio de conocimientos que permite afrontar mejor las épocas de penuria y la falta de alimentos. Cuando la comida escasea, los límites o fronteras culturales parecen ser más permeables al intercambio, pues la supervivencia del grupo está en juego.

Asimismo, resulta interesante constatar que el uso de ciertas especies varía de un grupo a otro: mientras uno las utiliza con fines medicinales, el otro las recolecta para venderlas a intermediarios. La gente valora más las plantas que emplea en su día a día que las que únicamente comercializa. Como indican los autores, ello puede tener una gran influencia en la conservación de estos recursos. La relación con el recurso es mucho más íntima en el caso de las especies utilizadas para nuestro uso particular. De hecho, estas plantas tienen una mayor relevancia cultural y ocupan un lugar preeminente en la memoria e imaginario colectivos, ya que forman parte de la historia local y representan la esencia, personalidad e identidad de la comunidad.



THINKSTOCK/BZH22

LA ROSA SILVESTRE (*Rosa canina* L.) **es utilizada por goranis y albanos, los dos grupos étnicos balcánicos estudiados.**

El estudio demuestra que los valores culturales ejercen un efecto considerable sobre el conocimiento tradicional local, ya que la explotación sostenible de los recursos es mucho más esperable para aquellos que tienen un valor emocional que para los que se usan de un modo impersonal, como fuente de ingresos. Un trabajo publicado el año pasado por Eugene Hunn, de la Universidad de Washington, en *Ethnobiology Letters* indicaba que el éxito de numerosas comunidades indígenas en la conservación de sus recursos locales se debe a la combinación de un conocimiento muy amplio y experiencial de los mismos con un gran respeto y compromiso emocional con la naturaleza. Además, el artículo sugiere que nuestra inclinación por la conservación de la naturaleza depende de la cercanía y de lo intenso que sea el apego emocional con ella. Por tanto, si se pierde el conocimiento tradicional local, la biodiversidad peligra, tal y como ocurre en numerosos bosques y hábitats consagrados que en la actualidad están en proceso de transformación y degradación.

Por ello, es importante realizar investigaciones etnobotánicas como la de Quave y Pieroni que fomenten la integración del conocimiento tradicional local en las estrategias de conservación de la naturaleza. Al enfocarse estos estudios en conocer y analizar el punto de vista de la gente que depende o ha dependido íntimamente de los recursos locales, se pueden promover estrategias culturalmente apropiadas para el desarrollo sostenible. Desgraciadamente, esta integración no es muy frecuente en la bibliografía existente y los resultados de su aplicación no se han estudiado aún debidamente.

Por último, los autores demuestran que las técnicas etnobotánicas cuantitativas son de enorme utilidad y sugerimos que se siga profundizando en ellas. Sin duda, la investigación etnobotánica debe desempeñar un papel central en el estudio del modo en que los grupos étnicos coexisten con los ecosistemas que habitan y se benefician de ellos sin sobreexplotarlos. Políticos y gestores deberían tener en cuenta la tradición y cosmovisión de las comunidades locales, sobre todo en regiones rurales que sufren inestabilidad social y económica, si quieren llevar a cabo una gestión social y ambiental eficaz y sostenible.

—Manuel Pardo de Santayana
y Manuel J. Macía
Área de botánica
Dpto. de biología
Universidad Autónoma de Madrid

Artículo publicado en *Nature*, vol. 518, págs. 487-488, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015.

PARA SABER MÁS

Ethnobotany in the new Europe. People, health and wild plant resources. Editado por Manuel Pardo de Santayana, Andrea Pieroni y Rajindra K. Puri. Berghahn, Nueva York, Oxford, 2010.

To know them is to love them. E. Hunn en *Ethnobiology Letters*, vol. 5, págs. 146-150, 2014.

A reservoir of ethnobotanical knowledge informs resilient food security and health strategies in the Balkans. Cassandra L. Quave y Andrea Pieroni en *Nature Plants*, vol. 1, pág. 14021, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El conocimiento etnobotánico de los tsimane'. V. Reyes García y otros en *IyC*, enero de 2004.



Jay N. Giedd es director de la división de psiquiatría infantil y juvenil en la Universidad de California en San Diego y profesor en la Escuela Bloomberg de Salud Pública de Johns Hopkins. Es asimismo redactor jefe de la revista *Mind, Brain and Education*.



NEUROCIENCIA

La *plasticidad* del cerebro adolescente

¿Por qué a los jóvenes les atrae el riesgo? ¿Por qué aprenden con tanta agilidad? La clave reside en la versatilidad de sus redes neurales

Jay N. Giedd

EN SÍNTESIS

Las imágenes de resonancia magnética muestran que el cerebro del adolescente no es un órgano infantil envejecido ni tampoco uno adulto incompleto. Constituye un ente singular, con una gran versatilidad y una creciente instauración de redes neurales.

El sistema límbico, que rige la emotividad, se exacerba en la pubertad. En cambio, la corteza prefrontal, que pone freno a los impulsos, no madura hasta los veintitantos años. Este desfase, que lleva a los jóvenes a adoptar conductas arriesgadas, les permite también adaptarse pronto a su entorno. En la actualidad, los niños están llegando antes a la pubertad, y el período de desajuste se amplía.

Un conocimiento más pleno del cerebro juvenil ayudaría a las familias y a la sociedad a diferenciar mejor entre las conductas típicas de la adolescencia y las enfermedades mentales; y a los jóvenes, a convertirse en lo que deseen ser.

TINNA EMPERA, CLOUTIER/REMIX; MONICA COTTO (*diseño y composición*); HARRY CAMPBELL (*ilustración*), ETHAN HILL (*fotografía*)

El cerebro adolescente se considera a menudo con sarcasmo como un ejemplo de error biológico.

La neurociencia ha explicado que las conductas arriesgadas, agresivas o desconcertantes de los adolescentes son producto de alguna imperfección en el cerebro. Pero investigaciones innovadoras realizadas en los últimos diez años ponen de manifiesto que tal punto de vista resulta erróneo. El cerebro del adolescente no es defectuoso, ni tampoco se corresponde con el de un adulto a medio formar. La evolución lo ha forjado para que opere de distinta forma que el de un niño o el de un adulto.

Entre los rasgos del cerebro adolescente destaca su capacidad de cambio y adaptación al entorno gracias a la modificación de las redes de comunicación que conectan entre sí distintas regiones cerebrales. Esta peculiar versatilidad, o plasticidad, supone un arma de doble filo. Por un lado, faculta a estos jóvenes para avanzar a zancadas gigantescas en el pensamiento y la socialización. Por otro, la mutabilidad del entorno les torna vulnerables a conductas peligrosas y a graves trastornos mentales.

Los estudios más recientes señalan que los comportamientos temerarios surgen por un desfase entre la maduración de las redes del sistema límbico, que impele las emociones, y las de la corteza prefrontal, responsable del control de los impulsos y del comportamiento juicioso. Se sabe ahora que la corteza prefrontal continúa experimentando cambios notorios hasta bien entrada la veintena. Parece, además, que la pubertad se está anticipando, lo que prolonga los «años críticos» de desajuste.

La plasticidad de las redes que conectan entre sí distintas regiones cerebrales, y no el crecimiento de tales zonas, como se pensaba, resulta clave para alcanzar en última instancia el comportamiento adulto. Entenderlo así, y saber que en nuestros días se está alargando el lapso entre el desarrollo de las redes de la emoción y las del raciocinio, puede ser de utilidad para los padres, maestros, consejeros y a los propios adolescentes. Se comprenderá mejor que los comportamientos aventurados, la búsqueda de sensaciones, la distanciación de los padres y la aproximación a «colegas» no son signos de trastornos emocionales o cognitivos, sino un resultado natural del desarrollo cerebral; son un rasgo normal de los adolescentes, que están aprendiendo a habérselas con un mundo complejo.

Tal conocimiento puede también ayudar a los adultos a saber cuándo conviene intervenir. La quinceañera que repudia los gustos de sus padres en el vestir, la música o la política puede consternar a sus mayores, pero eso no es signo de enfermedad mental. El chaval de 16 años que se empeña en lanzarse sin casco en su monopatín o acepta retos temerarios de sus amigos probablemente actúe por impulsividad o por inducción de sus compañeros, no porque desee hacerse daño. No obstante, otras acciones exploratorias o agresivas sí son señal de peligro. Un conocimiento más pleno del singular cerebro adolescente servirá para distinguir mejor entre conductas inusitadas, pero propias de esa edad, de posibles indicios de trastorno mental. Este saber contribuiría a reducir las cifras de drogadicción juvenil, de enfermedades de transmisión sexual y de accidentes de circulación, amén de embarazos no deseados, depresiones y suicidios.

MAYOR CONECTIVIDAD

Pocos padres de adolescentes se sorprenderían al oír que el cerebro de un chico de 16 años no es como el de un niño de ocho. Pero a los investigadores les está costando precisar estas diferencias. El cerebro, revestido por una membrana coriácea y tenaz, rodeado de líquido y alojado en hueso, se halla bien protegido contra caídas, depredadores... y la curiosidad de los científicos.

La invención de técnicas de formación de imágenes, como la tomografía computarizada o por emisión de positrones, consintió ciertos progresos, pero como estas emiten radiaciones ionizantes, no son aptas, por razones éticas, para el estudio exhaustivo de los jóvenes. La resonancia magnética nuclear permitió al fin alzar el velo, al poder examinar con precisión y sin causar daños la anatomía y fisiología cerebrales de personas de todas las edades. Estudios en curso están analizando millares de gemelos y otros individuos a lo largo de toda su vida. Una observación recurrente es que el cerebro del adolescente no madura porque se vuelva más grande, sino porque sus componentes se interconectan cada vez más y se tornan más especializados.

En las imágenes de resonancia magnética, el aumento de conectividad entre regiones cerebrales se traduce en un mayor volumen de la sustancia blanca. El color blanco de esta se debe a un compuesto graso llamado mielina, que enfunda y aísla al axón, un largo filamento que se extiende desde el cuerpo celular de la neurona. La mielinización (la formación de estas fundas grasas), que empieza en la infancia y se prolonga hasta la edad adulta, acelera muy notablemente la conducción de impulsos nerviosos de unas neuronas a otras. Los axones mielinizados transmiten señales hasta 100 veces más rápido que los que no lo están.

La mielinización acelera también el procesado de información, pues contribuye a que los axones se recuperen rápidamente tras cada impulso nervioso y queden listos para lanzar otro mensaje. Ello permite multiplicar por 30 la frecuencia con que una neurona puede emitir información. La sinergia de transmisión rápida y brevedad de la recuperación multiplica por 3000 el ancho de banda computacional del cerebro en el intervalo de la infancia a la edad adulta, lo que posibilita una interconexión extensa y compleja de las regiones cerebrales.

Estudios recientes están revelando otra función de la mielina, más matizada. Las neuronas integran información que les llega desde otras, pero solo se activan para transmitirla si la señal aferente supera cierto umbral eléctrico. Cuando ello ocurre, se desencadena una cascada de cambios moleculares que refuerzan las sinapsis (los puntos de conexión) entre esa neurona y las remitentes.

Ese refuerzo de las conexiones constituye la base del aprendizaje. Se está averiguando ahora que, para que los impulsos de las

neuronas cercanas y de las distantes lleguen al mismo tiempo a otra concreta, la transmisión ha de estar perfectamente sincronizada. Y la mielina contribuye al ajuste fino de esta sincronía. Al entrar en la adolescencia, la rápida mielinización permite unir y coordinar cada vez más las actividades de un amplio repertorio de tareas cognitivas en diversas partes del cerebro.

Esa mudable interconectividad puede medirse mediante la teoría de grafos, una rama de las matemáticas que cuantifica la relación entre «nodos» y «enlaces» de una red. Los nodos son cualquier objeto o entidad detectable, trátese de una neurona, una estructura cerebral, como el hipocampo, o una región más extensa, como la corteza prefrontal. Los enlaces corresponden a las conexiones entre nodos, ya sean materiales, como las sinapsis, o correlaciones estadísticas, como cuando dos partes del cerebro se activan de forma similar durante una tarea cognitiva.

Gracias a la teoría de grafos, el autor y otros investigadores han medido el desarrollo e interconexión de diversas partes del cerebro y han establecido la relación de tales rasgos con la conducta y la cognición. La plasticidad cerebral no se limita a la adolescencia. La mayoría de los circuitos neurales se forman ya durante la gestación, y muchos continúan variando el resto de la vida. No obstante, en el segundo decenio aumenta de forma extraordinaria la conectividad entre las regiones implicadas en la formación de juicios y pareceres, la sociabilización y la planificación a largo plazo. Capacidades todas ellas que ejercerán una profunda influencia durante el resto de la vida del individuo.

LA HORA DE LA ESPECIALIZACIÓN

A la par que la sustancia blanca y las neuronas del adolescente van desarrollándose con la edad, otro cambio acontece. Lo mismo que otros procesos complejos de la naturaleza, el desarrollo cerebral cursa por superproducción seguida de eliminación selectiva. De igual modo que el *David* de Miguel Ángel salió a luz de un bloque de mármol, numerosos procesos cognitivos surgen de una transformación escultórica que cercena las conexiones no utilizadas o contraproducentes. Al mismo tiempo, las conexiones útiles son reforzadas. Aunque los procesos de poda y refuerzo prosiguen toda la vida, en la adolescencia la balanza se decanta por la eliminación. El cerebro se va construyendo a la medida de las exigencias del entorno.

La especialización resulta de la supresión de conexiones entre neuronas y de la reducción de sustancia gris. Esta consta en gran medida de estructuras no mielinizadas, como los somas de las neuronas, las dendritas (proyecciones neurales que actúan como antenas receptoras de información) y ciertos axones. En conjunto, la sustancia gris aumenta durante la infancia, alcanza un máximo hacia los 10 años y comienza su declive en la adolescencia. Se mantiene estable en el individuo adulto y decae algo en la senescencia. Esta regla vale también para la densidad de los receptores de las neuronas, los cuales responden a los neurotransmisores.

Aunque la cantidad de sustancia gris alcanza un máximo hacia la pubertad, el desarrollo pleno de las diferentes regiones cerebrales se produce en momentos distintos. La sustancia gris se acaba de formar primero en las áreas sensitivomotoras primarias, dedicadas a percibir y reaccionar ante estímulos visuales, auditivos, olfativos, gustativos y táctiles. La última en desarrollarse por completo es la corteza prefrontal, una región esencial para la funciones ejecutivas, como la capacidad de organización, decisión y planificación, además del control de las emociones.

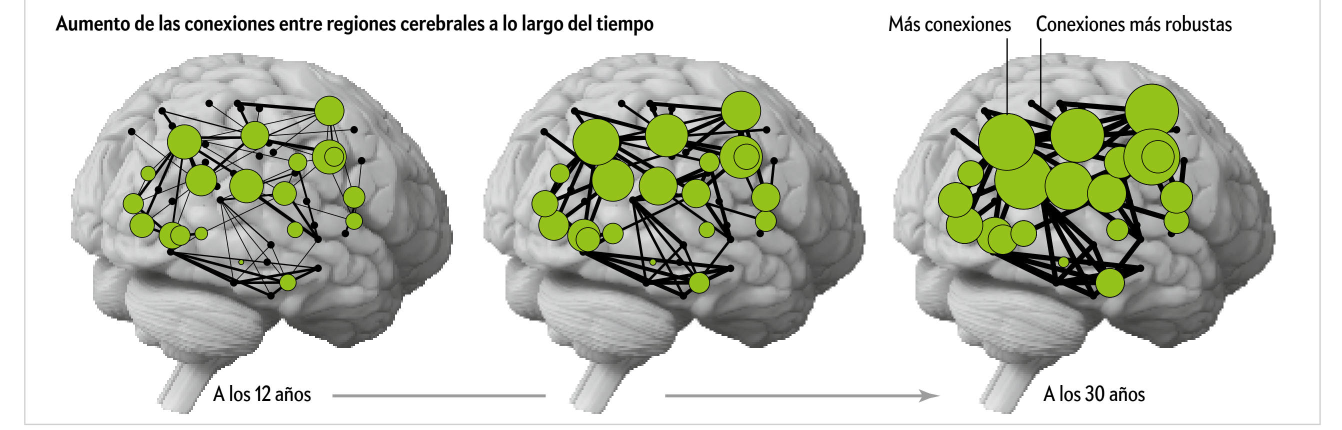
Una propiedad importante de la corteza prefrontal es su aptitud para idear situaciones hipotéticas al viajar mentalmente en el tiempo. Recupera acontecimientos del pasado y del presente y posibles hechos del futuro sin exponernos físicamente a una realidad que bien puede resultar peligrosa. En palabras del filósofo Karl Popper, en lugar de exponer nuestro ser a daños probables, «mueren por nosotros nuestras teorías». Conforme maduramos cognitivamente, las funciones ejecutivas nos llevan a preferir recompensas valiosas, aunque sean a largo plazo, frente a otras menores y más inmediatas.

UNA NUEVA PERSPECTIVA

La conectividad creciente lleva a la madurez

El cambio más importante en un cerebro adolescente no es el desarrollo de las regiones cerebrales, sino el de las comunicaciones entre grupos de neuronas. Al aplicar una técnica de análisis matemático (la teoría de grafos) a los datos obtenidos mediante resonancia magnética se aprecia cómo desde los 12 a los 30 años se refuerzan las conexiones entre ciertas regiones cerebrales o grupos de neuronas (*líneas negras cada vez más gruesas*). El análisis permite ver asimismo que ciertas zonas y grupos se van conectando más con otros (*círculos verdes cada vez mayores*). En última instancia, tales cambios permiten la especialización del cerebro en sus distintas tareas, desde el pensamiento complejo a la vida social.

Aumento de las conexiones entre regiones cerebrales a lo largo del tiempo



FUENTE: «DEVELOPMENT OF BRAIN STRUCTURAL CONNECTIVITY BETWEEN AGES 12 AND 30», POR EMILY L. DENIS ET AL EN *NEUROIMAGE*, VOL. 64, 1 DE ENERO DE 2013, VÍDEO SUPLEMENTARIO 2; DAVID KILLPACK (*cerebros*), JEN CHRISTIANSEN (*diagramas de nodos*)

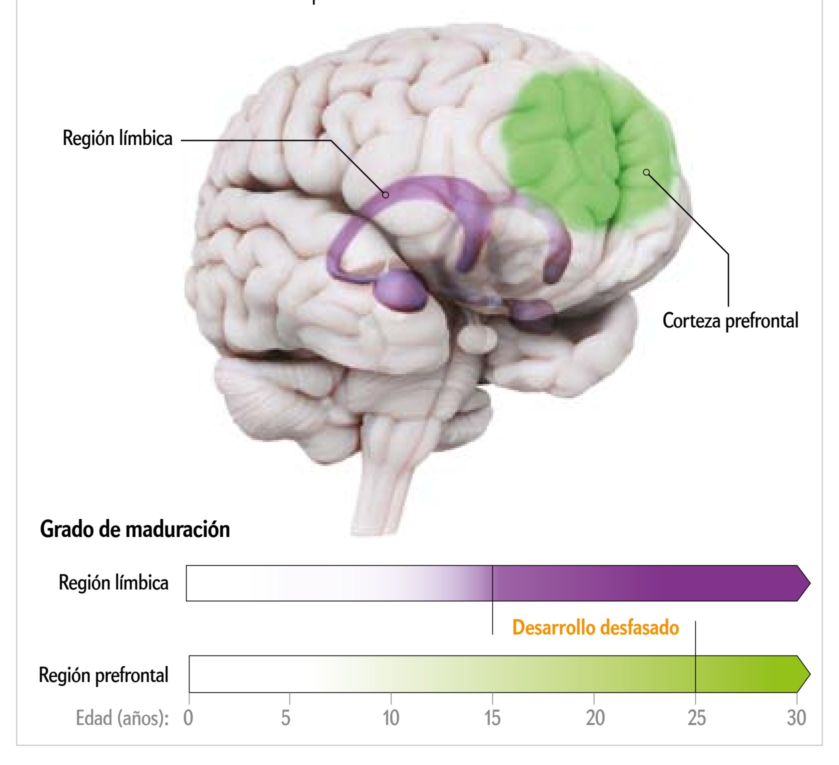
La corteza prefrontal constituye una parte fundamental de los circuitos implicados en la cognición social, esto es, nuestra destreza para transitar por complejas relaciones sociales, discernir amigos de enemigos, hallar cobijo en grupos y llevar a cabo la directiva más clara en la adolescencia: atraer a una pareja.

La adolescencia se caracteriza, pues, por modificaciones en las sustancias gris y blanca que, en conjunto, van transformando las conexiones neurales mientras va cobrando forma el cerebro adulto. Los adolescentes no carecen de las funciones de la corteza prefrontal; simplemente, no han alcanzado aún toda su plenitud. Dado que tales funciones no maduran por completo hasta que el individuo rebasa holgadamente la veintena, a edades más jóvenes pueden existir dificultades para controlar los impulsos o calibrar riesgos y recompensas.

ASUNCIÓN DE RIESGOS

Impulsividad frente a prudencia

Los adolescentes son más proclives que los niños o los adultos a implicarse en conductas arriesgadas, debido, en parte, al desajuste entre dos grandes regiones cerebrales. El desarrollo del sistema límbico (*lila*), estimulado por las hormonas, se acelera al comenzar la pubertad (habitualmente, entre los 10 y los 12 años) y va madurando en los años siguientes. Pero la corteza prefrontal (*verde*), que pone coto a los actos impulsivos, no se aproxima a su pleno desarrollo hasta unos diez años después, lo que conlleva un desequilibrio en el ínterin. Además, la pubertad se está adelantando cada vez más, lo que supone un alza de las hormonas cuando la corteza prefrontal se halla aún menos madura.



FUENTE: JAY N. GIEDD; DAVID KILLPACK (*cerebro*), JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

DESFASE EN LA MADURACIÓN

A diferencia de la corteza prefrontal, el sistema límbico, estimulado por las hormonas, experimenta cambios drásticos llegada la pubertad, que suele comenzar entre los 10 y los 12 años de edad. Tal sistema regula la emotividad y los sentimientos de gratificación. Interactúa también con la corteza prefrontal durante la adolescencia, y promueve la búsqueda de novedades, la asunción de riesgos y la tendencia a relacionarse con iguales. Estas conductas, de profundo arraigo biológico y observadas en todos los mamíferos sociales, animan a los jóvenes a alejarse del confort y seguridad de sus familias, explorar ambientes nuevos y entablar relaciones fuera de aquellas. Se limita así la endogamia y se promueven poblaciones genéticamente más sanas. Sin embargo, tales comportamientos pueden entrañar peligros no desdeñables, sobre todo si se combinan con tentaciones modernas, como el fácil acceso a las drogas, las armas de fuego o los vehículos muy veloces. Y todo ello sin el freno de la prudencia.

Por consiguiente, lo más determinante de la conducta juvenil no es el tardío desarrollo de las funciones ejecutivas o el precoz arranque de la conducta emotiva, sino el desfase temporal entre ambos procesos. Si se tiene en cuenta que los adolescentes más jóvenes son impelidos por el sistema límbico, y su control prefrontal dista de lo que será, por ejemplo, a los 25 años, ello deja abierto un decenio de desajustes entre el pensamiento emotivo y el contemplativo. Además, al anticiparse el inicio de la pubertad, se amplía el lapso desde la exacerbación de las conductas arriesgadas y de búsqueda de sensaciones, hasta que se configura una corteza cerebral robusta y estabilizadora.

La ampliación de ese período de desajuste viene a respaldar la noción, cada vez más extendida, de que el segundo decenio de vida y la adolescencia han dejado de ser sinónimos. Esta etapa, definida por la sociedad como transición de la infancia a la edad adulta, comienza biológicamente con la pubertad, pero concluye en un constructo social, a saber, cuando el individuo adquiere independencia y asume roles típicos de adulto. Y en EE.UU., tales roles, a menudo caracterizados por contraer matrimonio, engendrar hijos o tener un hogar, están ocurriendo unos cinco años más tarde que hace cuarenta.

El gran peso de los factores sociales en la definición de persona adulta ha llevado a algunos psicólogos a sugerir que la adolescencia no es tanto una realidad biológica cuanto un resultado de cambios en la crianza infantil habidos desde la revolución industrial. Pero los estudios con gemelos (que examinan los efectos relativos de los genes y del ambiente mediante el seguimiento de individuos genéticamente iguales pero con diferentes trayectorias vitales) refutan que los factores sociales lleguen a imponerse a la biología; por el contrario, hacen ver que el ritmo de maduración de las sustancias blanca y gris puede verse algo afectado por el entorno, pero, básicamente, tal evolución está controlada por la biología. También los sociólogos lo ven así. La asunción de riesgos, la búsqueda de sensaciones y la aproximación a los iguales se observa en todas las culturas, si bien no con el mismo grado.

VULNERABILIDAD Y OPORTUNIDADES

El desarrollo de las sustancias blanca y gris y de la conectividad detectado por resonancia magnética pone de relieve la magnitud de los cambios que acontecen en el cerebro adolescente.

Tal plasticidad suele decrecer en la edad adulta, aunque los humanos conservamos cierto grado de ella mucho más tiempo que cualquier otra especie.

Una maduración y plasticidad prolongadas permiten dejar opciones abiertas al devenir del propio desarrollo personal, como ha ocurrido en la evolución de nuestra especie. Logramos medrar en el gélido polo norte y en tórridas islas del ecuador. Las técnicas que nuestro cerebro ha desarrollado nos consienten vivir en naves que orbitan nuestro planeta. Hace 10.000 años —un abrir y cerrar de ojos en términos evolutivos— teníamos que dedicar casi todo el tiempo a encontrar abrigo y alimento. Ahora, muchos de nosotros invertimos gran parte de las horas de vigilia manipulando palabras y símbolos, cosa muy notable, pues la lectura cuenta solo unos 5000 años.

Esa prolongada plasticidad ha aportado ventajas a nuestra especie, pero la ha dotado también de puntos flacos. La adolescencia representa una edad crítica para la aparición de distintas enfermedades mentales, entre ellas, trastornos de ansiedad, trastorno bipolar, depresión, anorexia o bulimia, psicosis y drogadicción. Llama la atención que el 50 por ciento de las enfermedades mentales que sufren las personas ya las han adquirido a los 14 años, una cifra que se eleva al 75 por ciento a los 24 [*véase* «Trastornos mentales en la adolescencia», por Christian Wolf; Mente y cerebro n.º 63, 2013].

Conocer la relación que existe entre los cambios normales del cerebro adolescente y la aparición de psicopatologías resulta complejo. Pero una de las explicaciones plantea que la amplitud de los cambios en las sustancias blanca y gris y en la conectividad elevan la probabilidad de que surjan problemas. Por ejemplo, casi todas las anomalías cerebrales observadas en adultos esquizofrénicos hacen pensar en cambios típicos del cerebro adolescente que han sido llevados a un extremo.

En otros muchos aspectos, la adolescencia representa el período de la vida en el que se goza de mayor salud. El sistema inmunitario, la resistencia al cáncer, la tolerancia al calor o al frío y otros índices alcanzan valores máximos. Mas, a pesar de esta robustez física, las enfermedades y los fallecimientos resultan en esa edad dos o tres veces más frecuentes que en la infancia. Los responsables principales de las muertes juveniles son los accidentes de circulación. Homicidios y suicidios figuran en segundo y tercer lugar. También destacan los índices de embarazos no deseados, las enfermedades de transmisión sexual y las conductas punibles en prisión, cuyas duras consecuencias pueden lastrar toda una vida.

¿Qué pueden hacer, pues, médicos, familiares, educadores y los propios adolescentes? En la práctica clínica, la escasez de medicaciones psiquiátricas nuevas y la propensión del cerebro adolescente a adaptarse a los retos de su entorno hacen pensar que los tratamientos no farmacológicos podrían ofrecer la mejor solución, sobre todo si se introducen al principio de la adolescencia, cuando las sustancias blanca y gris y la conectividad están cambiando con rapidez. Sirva de ejemplo el trastorno obsesivo-compulsivo: las terapias conductuales que provoquen el impulso obsesivo en el paciente, pero que a la vez vayan modificando gradualmente la respuesta de esa persona pueden resultar muy eficaces y prevenir toda una vida de dificultades. Reconocer que el cerebro es maleable durante el segundo decenio de vida ayuda a desechar la idea de que un joven sea una «causa perdida» y abre la esperanza de poder orientar su devenir vital.

Realizar estudios más profundos reforzaría tales conocimientos. La infraestructura para la investigación de la adolescencia resulta escasa; su financiación es magra y pocos neurocientíficos se especializan en este grupo de edad. La buena nueva es que, conforme se van elucidando los mecanismos e influencias que determinan la evolución del cerebro adolescente, van aumentando los recursos que se destinan a este tema y los científicos que se interesan por él, ansiosos por minimizar los riesgos de estos jóvenes y dar uso ventajoso a su increíble versatilidad.

Entender la singularidad del cerebro adolescente y la rapidez de sus modificaciones serviría para que las familias, la sociedad y los propios jóvenes gestionasen mejor los riesgos y aprovechasen las oportunidades que esa edad ofrece. Tener constancia de que las funciones ejecutivas prefrontales se hallan todavía en construcción tal vez evite así que los padres de la muchacha que ha decidido teñirse el pelo de verde se excedan en la reprensión y se consuelen con la esperanza de que algún día se volverá más juiciosa. La plasticidad del cerebro adolescente permite concebir un diálogo entre padres e hijos sobre la libertad y la responsabilidad que puede influir en el desarrollo de sus jóvenes.

La capacidad de adaptación inherente a la adolescencia abre cuestiones sobre el efecto de una de las mayores transformaciones de todos los tiempos en nuestro entorno: la revolución informática. Ordenadores, videojuegos, teléfonos móviles y aplicaciones han afectado profundamente la forma en que aprenden, juegan e interactúan niños y jóvenes. Disponen estos de una voluminosa información, aunque de calidad muy variable. La pericia requerida en el futuro no consistirá en recordar hechos, sino en evaluar de modo crítico una gran cantidad de datos, discernir la señal del ruido, sintetizar contextos y emplear tales síntesis para abordar problemas del mundo real. Los educadores deberían proponer al cerebro adolescente ese tipo de tareas y entrenar su plasticidad para lo que va a exigirles la era informática.

Una sociedad más conectada ofrece también oportunidades irresistibles. Esta podría beneficiarse de la pasión, creatividad y destrezas que caracterizan ese período singular. Pero ha de entender asimismo que en esos años se cruzan varios caminos; unos conducen a la ciudadanía pacífica, otros a la agresión y, en casos raros, a actitudes radicales y extremas. Los adolescentes son, en todas las culturas, los más fáciles de reclutar para convertirse en soldados o terroristas, como también de orientar hacia la enseñanza o la ingeniería. Por otra parte, una comprensión más completa de su mudable cerebro podría resultar de utilidad a jueces y jurados a la hora de emitir veredictos en casos delictivos.

Por último, los avances recientes en la neurociencia de la adolescencia deberían animar a los jóvenes a entrenar su cerebro en la clase de pericias que les harán sobresalir el resto de la vida. Tienen una maravillosa ocasión para definir su propia identidad, perfeccionar el cerebro de acuerdo con sus gustos y prepararlo para un futuro que será rico en datos, muy diferente de las vidas de sus padres.

PARA SABER MÁS

The primal teen: What the new discoveries about the teenage brain tell us about our kids. Barbara Strauch. Doubleday, 2003.

Development of brain structural connectivity between ages 12 and 30: A 4-tesla diffusion imaging study in 439 adolescents and adults. Emily L. Dennis et al. en *NeuroImage*, vol. 64, págs. 671-684, 1 de enero de 2013.

Age of opportunity: Lessons from the new science of adolescence. Laurence Steinberg. Houghton Mifflin Harcourt, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

El cerebro adolescente. Valerie F. Reyna y Frank Farley, en *MyC*, n.º 26, 2007.

El mito del cerebro adolescente. Robert Epstein, en *MyC*, n.º 32, 2008.

COSMOLOGÍA

Toda la Luz del universo

Cada galaxia existente en el cosmos lleva emitiendo luz desde el principio de los tiempos. Tras años de búsqueda, los astrónomos han comenzado a detectar esa luz de fondo extragaláctica

Alberto Domínguez, Joel R. Primack y Trudy E. Bell

EN SÍNTESIS

El cielo nocturno no es completamente negro. Se halla impregnado por los fotones de luz ultravioleta, visible e infrarroja que han sido emitidos por todas las galaxias a lo largo de la historia cósmica.

Esta «luz de fondo extragaláctica» (EBL) se encuentra muy atenuada por efecto de la expansión del universo. Las fuentes luminosas del sistema solar y la Vía Láctea, mucho más brillantes, impiden detectarla por medios directos.

Hace poco, sin embargo, los astrónomos han dado con una técnica para cuantificarla: estudiar la manera en que los fotones de la EBL absorben la radiación gamma de alta energía procedente de agujeros negros supermasivos muy distantes.

La EBL que permea el espacio a diferentes distancias contiene información sobre cómo eran las galaxias en distintas épocas cósmicas. Su estudio aporta una herramienta completamente nueva para investigar la evolución del universo.

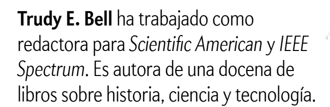


CALEB CHARLAND

¿Por qué el cielo nocturno es oscuro?

Alberto Domínguez es investigador posdoctoral en el departamento de física y astronomía de la Universidad de Clemson, donde estudia la evolución de las galaxias.

Joel R. Primack es profesor emérito de la Universidad de California en Santa Cruz. Ha destacado por sus contribuciones a la teoría moderna de la materia oscura y la formación de galaxias.



Trudy E. Bell ha trabajado como redactora para *Scientific American* y *IEEE Spectrum*. Es autora de una docena de libros sobre historia, ciencia y tecnología.

Si en el universo hay miles de millones de galaxias, cada una con miles de millones de estrellas que llevan miles de millones de años emitiendo fotones, ¿por qué su luz no inunda el cosmos? El astrónomo alemán Wilhelm Olbers se planteó esta pregunta hacia 1820, razón por la que el enigma se conoce hoy como «paradoja de Olbers». Por aquella época, sin embargo, astrónomos y filósofos llevaban ya siglos cuestionándose por qué el cielo nocturno es oscuro y qué nos dice esa oscuridad sobre la naturaleza del universo. Como veremos, aquellos eruditos andaban tras la pista de un fenómeno verdaderamente profundo.

En el firmamento hay mucha más luz de la que podemos ver. Incluso en el espacio intergaláctico, muy lejos de la Vía Láctea, el cielo no es completamente negro: brilla con la llamada «luz de fondo extragaláctica» (EBL, por sus siglas en inglés). Esta se encuentra formada por todos los fotones con longitudes de onda comprendidas entre el ultravioleta cercano y el infrarrojo lejano que han sido radiados por todas las estrellas y galaxias a lo largo de la historia cósmica. La EBL procedente de galaxias lejanas es tenue, ya que el espacio extragaláctico resulta enorme en comparación con las galaxias que brillan hoy o con las que alguna vez lo hicieron en el pasado. Dado que el universo se está expandiendo, los fotones emitidos por esas galaxias se han ido diluyendo en la vastedad del espacio a lo largo del tiempo. Y, debido a la expansión cósmica, la EBL se nos muestra hoy desplazada hacia el rojo, lo que ha aumentado su longitud de onda hasta dejarla fuera del espectro visible.

Aunque los astrónomos sabían desde hacía tiempo que esa luz de fondo extragaláctica tenía que existir, no han sido capaces de medirla con precisión hasta hace poco. Entre 2012 y 2013, varios investigadores (incluidos dos de nosotros, Domínguez y Primack) lograron cuantificar por primera vez la luz de fondo extragaláctica. Para ello emplearon los datos del telescopio espacial de rayos gamma Fermi, de la NASA, así como los de varios observatorios terrestres conocidos como «telescopios Cherenkov atmosféricos» (detectores de rayos gamma de muy alta energía). El estudio de la EBL tiene una consecuencia fascinante: dado que la mayor parte de dicha radiación procede de las estrellas —bien por emisión directa, o bien por el calentamiento que estas causan en el polvo, el cual radia después en longitudes de onda mayores—, este fondo de luz difusa conserva cierta «memoria» sobre los procesos de formación estelar que han tenido lugar a lo largo de la historia cósmica. De hecho, las mediciones de la EBL están ayudando a entender mejor la evolución de las galaxias, desde épocas muy remotas hasta el presente. E incluso es posible que su estudio permita investigar la primera generación de galaxias, formadas hace más de 13.000 millones de años y cuya luz es hoy demasiado débil para captarla con los telescopios actuales.

FONDOS CÓSMICOS

La paradoja de Olbers fue considerada una cuestión principalmente filosófica hasta los años sesenta del siglo xx. Por entonces, una serie de grandes descubrimientos astronómicos acabaron con el carácter especulativo de la cosmología y la convirtieron en una verdadera ciencia observacional. Los investigadores comenzaron a identificar todo un bestiario de objetos galácticos y extragalácticos. Y, poco a poco, quedó claro que el universo debía estar lleno de un «gas» enrarecido de fotones que se propagaban en todas las direcciones del espacio. Dichos fotones abarcan una gran variedad de longitudes de onda o, dicho de otro modo, múltiples intervalos de energía. Ese gas ubicuo incluye tanto la EBL como otros campos de radiación. El más brillante es el fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés), cuya luz fue emitida poco después de la gran explosión. En 1965, Arno Penzias y Robert W. Wilson descubrieron el CMB mientras trabajaban en los Laboratorios Bell, lo que en 1978 les valió el premio Nobel de física. Otro campo de radiación, un fondo difuso de rayos X de origen extragaláctico, fue descubierto en los años sesenta mediante cohetes sonda. Y, a finales de la misma década, un observatorio solar en órbita encontró otro fondo de rayos gamma, más energéticos.

La EBL corresponde al fondo cósmico que comprende las longitudes de onda del ultravioleta cercano, el visible y el infrarrojo lejano, y es, después del CMB, el que posee mayor energía e intensidad. A diferencia del CMB, la EBL no se generó toda al mismo tiempo, sino que lleva miles de millones de años acumulándose. Comenzó a hacerlo cuando nacieron las primeras estrellas y galaxias, unos 200 millones de años después de la gran explosión, y sigue creciendo hoy a medida que nacen y comienzan a brillar nuevas estrellas.

Medir directamente la EBL con un telescopio sería como tratar de distinguir la tenue banda de la Vía Láctea en una calle repleta de rascacielos iluminados. Ello se debe a que en nuestro entorno cósmico existen multitud de fuentes luminosas que, al igual que la EBL, brillan en las longitudes de onda visibles e infrarrojas. La Tierra se halla inmersa en una galaxia con miles de millones de estrellas y con enormes nubes de gas brillante que eclipsan la EBL. Y, aún peor, nuestro planeta se encuentra en un sistema solar muy brillante: el polvo situado en las inmediaciones de la órbita terrestre dispersa la radiación solar y da lugar a la luz zodiacal. Esta brilla en longitudes de onda similares a las de la EBL y resulta tan luminosa que, desde un sitio oscuro y en el momento adecuado del año, puede llegar a confundirse con el amanecer.

Así pues, ¿podemos aislar e identificar los fotones de la EBL desde el resplandor del sistema solar y la Vía Láctea? Lamentablemente, no. Ni los telescopios espaciales ni los terrestres han logrado medir de manera directa y fiable la EBL. En el año

2000, Piero Madau, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Lucia Pozzetti, del Observatorio Astronómico de Bolonia, sumaron la luz de todas galaxias detectadas por el telescopio espacial Hubble. Sin embargo, aquel cálculo no tenía en cuenta la contribución de las galaxias más tenues ni la de otras posibles fuentes, por lo que solo proporcionaba un límite inferior para el brillo de la EBL a diferentes longitudes de onda. (Recordemos que la EBL incluye la luz ultravioleta, visible e infrarroja emitida por *todas* las galaxias, desde las más brillantes y fáciles de ver hasta aquellas tan débiles que escapan a los mejores telescopios.)

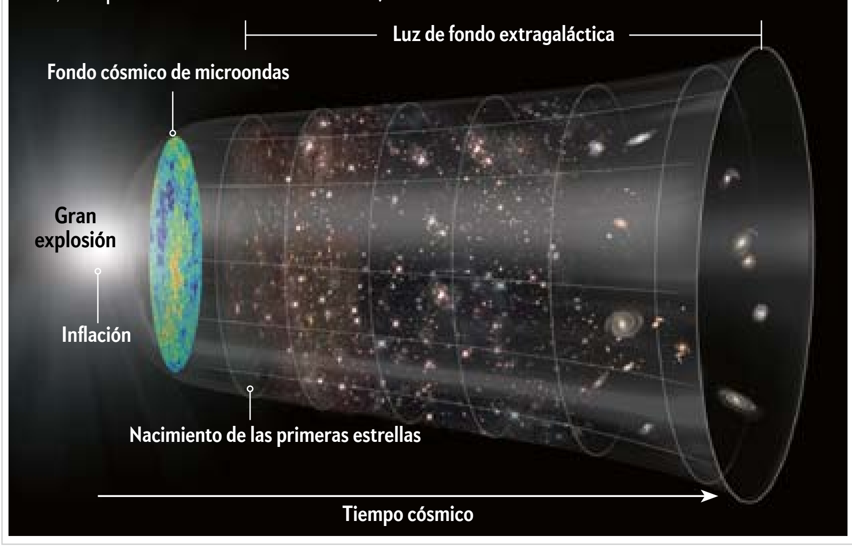
En 2011, dos de nosotros (Domínguez y Primack) establecimos, junto con un equipo de colaboradores, límites inferiores más estrictos para la EBL. Para ello, combinamos los datos de telescopios espaciales y terrestres relativos a la radiación infrarroja y visible procedente tanto de galaxias cercanas como de aquellas cuya luz ha tardado hasta 8000 millones de años en llegar a la Tierra; es decir, radiación que fue emitida cuando el universo tenía poco menos de la mitad de su edad actual, o, en jerga astronómica, luz con un desplazamiento al rojo igual a 1. (Al observar objetos muy lejanos, los vemos tal y como eran cuando la luz que nos llega de ellos emprendió su camino, por lo que mirar a grandes distancias en el espacio equivale a remontarse muy atrás en el tiempo.) En concreto, estudiamos la forma en que cambiaban las longitudes de onda emitidas por galaxias situadas a diferentes distancias; es decir, pertenecientes a distintas épocas cósmicas. Gracias a este método, logramos la mejor determinación de la EBL basada en observaciones obtenida hasta la fecha. También calculamos de manera aproximada límites superiores e inferiores para la EBL procedente de galaxias más distantes y antiguas (aquellas con desplazamientos al rojo mayores que 1).

Con todo, acabar de cuantificar el brillo de la luz de fondo extragaláctica exigió tomar un camino alternativo.

CAMPOS DE RADIACIÓN

Un nuevo fondo cósmico

La luz de fondo extragaláctica incluye la luz ultravioleta, visible e infrarroja emitida por todas las galaxias del universo. Comenzó a acumularse cuando se formaron las primeras estrellas y galaxias, unos 200 millones de años después de la gran explosión, y continúa haciéndolo aún hoy. Debido a la expansión cósmica y a las gigantescas proporciones del espacio intergaláctico, dicha luz es muy tenue y difusa. Otro campo de radiación que impregna todo el espacio es el fondo cósmico de microondas. Este, sin embargo, no aumenta con el tiempo, ya que fue emitido de una sola vez cuando el universo contaba 380.000 años (el 0,003 por ciento de su edad actual).



FAROS CÓSMICOS DISTANTES

Ya en los años sesenta, los astrónomos comenzaron a considerar la posibilidad de detectar la EBL a partir de su interacción con otras formas de luz más fácilmente observables.

Los fotones pueden colisionar entre sí. En particular, cuando un fotón gamma muy energético colisiona con otro de baja energía, ambos pueden aniquilarse y producir un electrón y su antipartícula, el positrón. Así pues, algunos astrónomos comenzaron a preguntarse qué ocurriría si, en su camino hacia la Tierra, los rayos gamma de una fuente cósmica muy distante chocasen con los fotones de menor energía de la EBL. ¿Podrían estos últimos interceptar los rayos gamma y hacer que disminuyese el brillo aparente de la fuente lejana? Si esa atenuación de la radiación gamma pudiera detectarse, tal vez ello permitiese inferir la composición de la EBL.

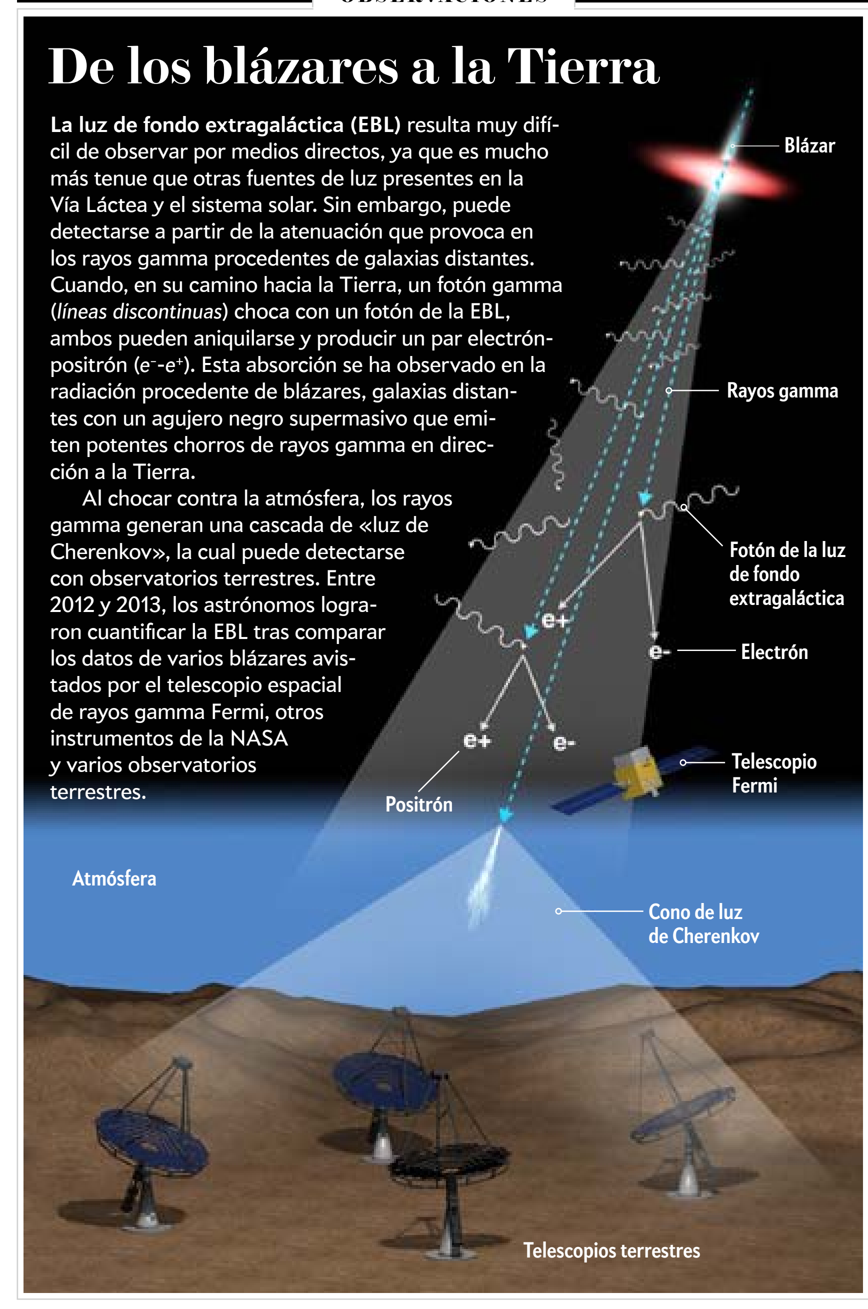
La pregunta no dejó de ser una mera especulación teórica hasta 1992. Aquel año, el detector EGRET, a bordo del observatorio de rayos gamma Compton, de la NASA, descubrió el primer representante de una nueva clase de fuentes de rayos gamma: los blázares (del inglés *blaze*, «resplandecer»), galaxias con un agujero negro central supermasivo que emiten potentes chorros de rayos gamma en dirección a la Tierra. La radiación procedente de estos objetos alcanza energías extraordinarias, de varios gigaelectronvoltios (GeV). Algunos, como Markarian 421 (Mrk 421), emiten rayos gamma de hasta 20 teraelectronvoltios (TeV), una energía 100 millones de veces mayor que la de los rayos X empleados en medicina.

Situado a unos 400 millones de años luz, el blázar Mrk 421 se encuentra, en términos extragalácticos, relativamente cerca de la Tierra. Su existencia llevó a Primack a preguntarse si habría otros blázares igual de energéticos pero situados mucho más lejos, ya que en tal caso resultarían útiles para detectar la EBL. Y, de hecho, durante los años siguientes comenzaron a aparecer blázares cada vez más distantes que también emitían rayos gamma a energías del orden del TeV. Por su parte, Domínguez comenzó a investigar cómo aprovechar tales objetos para medir la EBL en 2006, año en que inició su tesis doctoral en la Universidad de Sevilla, donde estudió las propiedades de los blázares con el observatorio de rayos gamma MAGIC, en la isla de La Palma.

En 2012, Domínguez fue uno de los casi 150 autores que, liderados por Marco Ajello, hoy en la Universidad de Clemson, midieron por primera vez cuánta radiación gamma procedente de blázares era absorbida por la EBL. A partir de los datos del telescopio espacial Fermi, el equipo analizó 150 blázares situados a diferentes distancias y determinó cuánto se atenuaba su brillo conforme aumentaba el trayecto recorrido por la luz; es decir, a

DON FOLEY

OBSERVACIONES



medida que esta atravesaba un espesor de EBL cada vez mayor. Sus observaciones se extendían hasta un desplazamiento al rojo de 1,6, correspondiente a luz emitida hace casi 10.000 millones de años.

Sin embargo, refinar aquella medición exigía entender mejor la naturaleza de los blázares, ya que era necesario averiguar cuántos rayos gamma producen estos objetos antes de que, en su viaje de miles de millones de años luz hasta la Tierra, algunos de ellos sean absorbidos por la EBL.

La mejor manera de estimar la luminosidad intrínseca de un blázar consiste en combinar los modelos teóricos sobre su funcionamiento (en particular, sobre el mecanismo responsable de la producción de rayos gamma de muy alta energía) con los datos empíricos sobre sus emisiones de rayos X y rayos gamma menos energéticos, los cuales sufren menos la absorción por parte de la EBL. Se cree que, en numerosos blázares, los rayos gamma de alta energía se generan en un proceso conocido como «emisión de sincrotrón auto-Compton» (SSC, por sus siglas en inglés). En el chorro de un blázar, la interacción de los haces de electrones y de positrones con los campos magnéticos produce rayos X. Después, algunos de esos rayos son golpeados («dispersados por efecto Compton», en jerga técnica) por los mismos electrones que los produjeron, lo que incrementa su energía y los convierte en rayos gamma. A partir de la cantidad de rayos gamma de baja energía que observamos desde la Tierra, los modelos basados en la SSC permiten predecir la producción intrínseca de rayos gamma más energéticos.

En 2013, dos de nosotros (Domínguez y Primack), junto con Justin Finke, del Laboratorio de Investigación Naval de Estados Unidos, Francisco Prada, del Instituto de Astrofísica de Andalucía, y otros investigadores cotejamos las observaciones casi simultáneas de 15 blázares situados a diferentes distancias cósmicas. Estos habían sido examinados en distintas longitudes de onda por media docena de telescopios espaciales de la NASA y por varios instrumentos terrestres. Para los mismos blázares, comparamos los resultados del telescopio espacial de rayos gamma Fermi con la intensidad en rayos X medida por los satélites Chandra, Swift, Rossi y XMM-Newton, y con la correspondiente a longitudes de onda visibles y de radio obtenida por observatorios terrestres.

Al cotejar esas observaciones con los modelos teóricos de emisión en un blázar, logramos inferir la producción intrínseca de los rayos gamma más energéticos (con energías del orden de varios TeV) para 9 de esos blázares. A continuación, comparamos dichos cálculos con las mediciones directas de rayos gamma (es decir, después de la atenuación causada por la EBL) de los mismos blázares recopiladas por telescopios terrestres. De esta menara, al analizar el efecto de la EBL sobre los rayos gamma de diferentes energías emitidos por varios blázares con distintos desplazamientos al rojo, conseguimos cuantificar la luz de fondo extragaláctica.

UNA VENTANA AL PASADO

La medición de la EBL supuso uno de los mayores retos a los que se ha enfrentado la astronomía observacional: percibir una señal tan débil y difusa requirió que telescopios e investigadores de todo el mundo se coordinasen para observar de manera simultánea objetos extremadamente lejanos. Sin embargo, nos ha proporcionado una nueva y potente herramienta para estudiar la historia del cosmos.

En los años noventa, casi inmediatamente después de que los astrónomos se percatasen de que los blázares podrían resultar útiles para estudiar la EBL, Primack y Donn MacMinn, por entonces un brillante estudiante de último año de carrera

FUENTE: NINA McCURDY Y JOEL R. PRIMACK/CENTRO DE ASTROCOMPUTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA; FOTOGRAMA DE UNA ANIMACIÓN DE WOLFGANG STEFFEN/UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (*blázar*)

en la Universidad de California en Santa Cruz, comenzaron a explorar qué nos dirían dichas mediciones sobre la evolución de las galaxias. Este proceso plantea numerosas preguntas básicas cuya respuesta aún desconocemos. Por ejemplo, ignoramos cuán frecuentes eran las estrellas masivas en las diferentes etapas del desarrollo galáctico; la manera en que el polvo absorbió la luz de las estrellas para reemitirla después en longitudes de onda más largas; o cómo varió el número de estrellas nacidas en las distintas galaxias a lo largo de la historia cósmica. MacMinn y Primack se preguntaron si, al estudiar los rayos gamma procedentes de blázares situados a diferentes distancias (es decir, radiación gamma que ha atravesado distintas cantidades de EBL), sería posible responder algunas de estas cuestiones fundamentales.

Sabemos que las galaxias muy distantes (aquellas correspondientes al universo temprano) presentan un aspecto muy distinto del de las galaxias cercanas. En vez de ser esferoides regulares o magníficas espirales, se ven compactas y deformadas. Esto se debe, en parte, a las colisiones que tuvieron lugar entre ellas, ya que el universo joven era mucho más denso que el actual. Además, en comparación con las galaxias próximas, las más lejanas emiten una fracción mayor de su luz en el infrarrojo. Eso significa que la EBL procedente de las galaxias muy antiguas exhibe un espectro distinto del que caracteriza a la EBL de las galaxias más recientes. Por tanto, los rayos gamma procedentes de fuentes situadas a distintas distancias se atenúan de manera diferente.

En 1994, MacMinn y Primack ya habían realizado suficiente trabajo teórico preliminar para concluir que el factor dominante en la determinación de las características de la EBL sería la época de formación de galaxias en que se emitieron los fotones. Predijeron la manera en que la atenuación de rayos gamma causada por la EBL evolucionaría en el tiempo en distintos escenarios de evolución cósmica y, al final, demostraron que las mediciones de la absorción de rayos gamma con energías del orden del TeV procedentes de fuentes situadas a diferentes distancias bastaría para distinguir entre teorías rivales sobre la evolución de las galaxias.

Ahora que disponemos de las primeras mediciones de la EBL obtenidas a partir de la atenuación de los blázares, estamos empezando a estudiar esos datos con el objetivo de reconstruir los procesos de formación de estrellas y galaxias a lo largo de la historia cósmica. El espectro de longitudes de onda de la EBL permite atisbar qué ocurrió durante el período más intenso de gestación estelar, una especie de «mediodía cósmico» ocurrido hace entre 12.000 y 8000 millones de años. El espectro de la EBL muestra dos picos: uno que representa la luz ultravioleta y visible de las estrellas, y otro mayor, correspondiente al infrarrojo lejano, el cual parece estar causado por el polvo. Sabemos que, cuando explotan, las estrellas expulsan polvo (compuesto por elementos pesados como carbono, oxígeno y hierro), el cual envuelve y esconde las regiones de formación estelar. Y también que, durante aquel mediodía cósmico, el polvo absorbió gran parte de la luz de las estrellas y la reemitió después en el infrarrojo. La EBL nos brinda un método para estudiar cuán frecuentes eran dichas galaxias oscurecidas por el polvo durante aquella era. Este aspecto reviste también importancia para entender la formación de los planetas rocosos, como la Tierra, ya que estos contienen grandes cantidades de polvo cósmico.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Resulta enormemente satisfactorio ver cómo un sueño que comenzó hace más de dos décadas se hace realidad y cómo un gran número de instrumentos han confirmado las predicciones sobre la EBL. Y es emocionante explorar estos nuevos datos —en realidad, este nuevo instrumento cosmológico— para comenzar a discernir qué nos dice la EBL sobre la evolución del universo.

Las investigaciones futuras sobre la EBL tal vez nos permitan estudiar otras épocas más remotas de la historia cósmica. Si pudiéramos ampliar nuestras observaciones para incluir fuentes de rayos gamma con grandes desplazamientos al rojo, sería posible estudiar la era de reionización del universo (el momento en que la luz ultravioleta de las primeras estrellas ionizó el hidrógeno presente en el medio), ocurrida durante los primeros 1000 millones de años que siguieron a la gran explosión. Ese es uno de los principales objetivos de la Batería de Telescopios Cherenkov (CTA, por sus siglas en inglés), un proyecto internacional actualmente en diseño y que contará con varias instalaciones tanto en el hemisferio norte como en el sur (dos de los lugares considerados son la isla de La Palma, en Canarias, y el cerro Armazones, en Chile). Además, una vez que entendamos y cuantifiquemos mejor la EBL, podremos sustraer su atenuación de las observaciones de blázares y estallidos de rayos gamma y obtener una imagen mucho más detallada de la naturaleza intrínseca de estos objetos.

Por ahora, la intensidad de la EBL inferida indirectamente a partir de la atenuación de los rayos gamma resulta compatible con la que arrojan las observaciones directas de galaxias pertenecientes a diferentes épocas cósmicas. Esta concordancia parece implicar que luz visible e infrarroja emitida por las galaxias es la misma que causa la absorción de los rayos gamma.

A medida que las observaciones mejoren, podrán ocurrir dos cosas: o bien que el acuerdo entre estas dos formas de medir la EBL se incremente (lo que impondría estrictos límites a la existencia de otras fuentes de luz en el cosmos, como la desintegración de partículas exóticas remanentes del universo temprano), o bien que comiencen a aparecer discrepancias, lo que apuntaría a fenómenos novedosos (como la conversión de partículas hasta ahora desconocidas en rayos gamma). La observación continuada con los instrumentos existentes y con la futura CTA deberían proporcionar datos cada vez más precisos. Asimismo, las mejoras en las técnicas de observación de galaxias distantes, como las que cabe esperar que faciliten el futuro telescopio espacial James Webb, el Gran Telescopio para Rastreos Sinópticos (LSST) o los telescopios terrestres de 30 metros, nos permitirán profundizar en el proceso de formación de galaxias.

Ya sabemos la respuesta a la paradoja de Olbers. El cielo nocturno no es oscuro: brilla con el resplandor de todas las galaxias que alguna vez han existido, por más que su luz resulte muy difícil de detectar. Y cada nueva supernova que estalla, cada estrella que nace y cada nube de polvo caliente añade un ápice de luz a ese fondo cósmico que llena cada centímetro cúbico del universo.

PARA SABER MÁS

Detection of the cosmic γ-ray horizon from multiwavelength observations of blazars. A. Domínguez et al. en *Astrophysical Journal*, vol. 770, n.º 1, artículo 77, 10 de junio de 2013. Disponible en **iopscience.iop.org/0004-637X/770/1/77/article**

EN NUESTRO ARCHIVO

Inventario cósmico. Günther Hasinger y Roberto Gilli en *IyC*, mayo de 2002.



UN COHETE PARA

¿Es el Sistema de Lanzamiento Espacial de la NASA una maniobra



LLEGAR A MARTE

política o la mejor oportunidad de enviar seres humanos al planeta rojo?

David H. Freedman

LOS MOTORES RS-25, de la compañía Aerojet Rocketdyne, ya fueron empleados en el transbordador espacial. Pronto impulsarán el próximo vehículo de la NASA para la exploración del espacio interplanetario, el Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS).

David H. Freedman es redactor colaborador en *The Atlantic*. Ha publicado sobre temas científicos, económicos y tecnológicos durante 30 años. Su último libro, *Equivocados: Por qué los expertos siguen fallando y cómo saber cuándo no confiar en ellos* (Empresa Activa, 2011) explora las prácticas científicas que inducen a engaño.



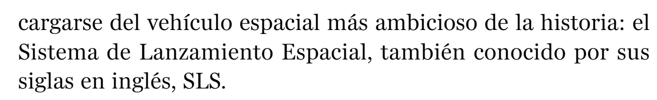


Una gigantesca pero poco conocida instalación de la NASA

ha estado albergando durante años minuciosos simulacros de misiones espaciales. No se trata de ninguna teoría de la conspiración: es la triste historia de la Planta de Montaje de Michoud, el vasto complejo de Nueva Orleans en el que la agencia ha construido durante décadas sus mayores cohetes.

Tras el último vuelo del transbordador espacial, en 2011, las inmensas instalaciones fueron arrendadas a estudios de Hollywood, que las aprovecharon para alojar parte de la producción de *El juego de Ender* y otras películas de ciencia ficción.

Desde hace un tiempo, sin embargo, una tropa creciente de ingenieros de la NASA ha regresado a Michoud para hacerse cargo de una nueva producción: la secuela de los grandes días en los que la agencia enviaba vuelos tripulados al espacio. Las instalaciones han vuelto a la fabricación de cohetes para encargarse del vehículo espacial más ambicioso de la historia: el Sistema de Lanzamiento Espacial, también conocido por sus siglas en inglés, SLS.



El SLS es el cohete con el que la NASA espera enviar desde Cabo Cañaveral una tripulación de astronautas a Marte. En un viaje de aproximadamente un año, la nave también deberá transportar los módulos de vivienda, vehículos y suministros necesarios para que los intrépidos exploradores pasen al menos unas semanas en el polvo oxidado del planeta rojo. Aunque

EN SÍNTESIS

Tras la cancelación del programa Constellation, la NASA decidió encargar a contratistas privados el acceso a las órbitas bajas y construir su propio cohete, el Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS), para enviar vuelos tripulados al espacio interplanetario.

Respaldado con gran fervor por congresistas estadounidenses cuyas circunscripciones se beneficiarían del proyecto, el SLS ha sido criticado por obedecer más a motivaciones políticas que científicas, por falta de innovación y por las escasas posibilidades de que acabe volando.

Sin embargo, por ahora el proyecto está cumpliendo con los plazos y el presupuesto previstos. Aunque su supervivencia dependerá de futuras decisiones políticas, el primer vuelo está previsto para 2018. ¿Será esta la primera nave que lleve seres humanos a la superficie de Marte?

JEFF WILSON (*fotografías*)



EL PRÓXIMO AÑO, los ingenieros de la NASA del Centro Espacial Stennis (*fotografía*), en Misisipi, efectuarán las primeras pruebas de puesta en marcha de la etapa central del SLS, de 70 metros de altura.

dicho objetivo se encuentra a unos 25 años vista, antes de eso el SLS debería poder llevar seres humanos a la Luna, a un asteroide o enviar una sonda para buscar vida en Europa, una de las lunas de Júpiter. Se trata de uno de los proyectos más audaces jamás emprendidos por la NASA. Entonces, ¿por qué tanta gente lo odia?

LA HERENCIA DEL TRANSBORDADOR

Tras el vertiginoso triunfo del programa de exploración lunar Apolo, a finales de los años sesenta y principios de los setenta, se suponía que el transbordador espacial convertiría el acceso a la órbita terrestre en una empresa relativamente barata y rutinaria. Sin embargo, cada viaje acabó costando una media de 1000 millones de dólares y, entre los pocos vuelos de la lanzadera, dos acabaron en catástrofe.

En 2004, un año después de que el *Columbia* se desintegrase durante su reentrada en la atmósfera y acabase con la vida de sus siete tripulantes, el presidente George W. Bush encargó a la NASA que sustituyese el transbordador por un programa más parecido al Apolo, uno que permitiese regresar a la Luna y llegar algún día a Marte. El proyecto resultante, bautizado Constellation, condujo al diseño de dos nuevos cohetes Ares, un vehículo de lanzamiento para vuelos tripulados y una especie de versión gigante del Saturno V para el transporte de carga. Pero, siete años y 9000 millones de dólares después, el único resultado del programa Constellation fue *Orion*, una cápsula para vuelos tripulados construida por Lockheed Martin, y un cohete que había efectuado un vuelo de prueba. Barack Obama canceló el proyecto y encomendó a la NASA que se centrase en una misión a un asteroide. Como consecuencia, la agencia tuvo que recurrir al sector privado para enviar carga y tripulación a la Estación Espacial Internacional (ISS).

A pesar de todo, numerosos congresistas insistieron en que la NASA debía continuar con el desarrollo de un cohete de carga pesada capaz de llevar seres humanos a la Luna y a Marte. El compromiso fue el SLS: un único cohete que serviría tanto para carga como para tripulación, que renunciaría a gran parte de la tecnología diseñada para el Ares y que, en su lugar, aprovecharía en buena parte los motores, cohetes adosados y tanques del transbordador espacial. En otras palabras, una versión barata del Ares.

El SLS ha vivido desde el principio bajo la sospecha de ser una artimaña del Congreso estadounidense para blindar puestos de trabajo en la NASA y sus principales contratistas. «Este vehículo puede presumir de ser el primer cohete que ha sido diseñado por políticos en vez de por científicos e ingenieros», señalaba *The Economist* en un editorial el pasado mes de diciembre. Los críticos lo han apodado «Cerdo Volador» o «Sistema de Lanzamiento del Senado». Y, de hecho, sus más fervientes defensores políticos han sido senadores de estados sureños que albergan grandes instalaciones de la NASA o de sus contratistas. Entre ellos, Richard Shelby, senador por Alabama, donde se encuentra el Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA, en el que trabajan unas 6000 personas y entre cuyos cometidos figura el desarrollo del SLS; y David Vitter, de Luisiana, donde se ubica el complejo de Michoud y en el que Boeing, el principal contratista para la etapa central del SLS, ha desplegado gran parte de las 1500 personas que ya trabajan en el programa.

Y realmente es un gran programa y un gran cohete. La primera versión del SLS contará con una etapa central inferior impulsada por cuatro motores RS-25, ya usados en el transbordador espacial y alimentados por el combustible habitual de oxígeno e hidrógeno líquidos. A cada lado de ella se acoplarán cohetes

impulsores de combustible sólido, los cuales proporcionarán el empuje adicional necesario para conseguir que el voluminoso cohete despegue. Una segunda etapa, situada sobre la primera, se activará a una altitud de unos 50 kilómetros y servirá para poner el vehículo en órbita. La cápsula tripulada, *Orion*, se emplazará en la cúspide. Con sus 98 metros, el SLS será algo más corto pero más potente que el Saturno V, que envió todas las misiones tripuladas a la Luna, y podrá transportar hasta tres veces más carga que la lanzadera espacial. Ninguno de sus componentes se ha diseñado para que sea reutilizable. Durante la próxima década, las versiones sucesivas del SLS incluirán motores y cohetes adosados más potentes. Y el vehículo capaz de llegar a Marte gozará de una etapa superior cuyo impulso duplicará al de la primera versión.

Los críticos argumentan que, al exigir que el SLS aproveche los componentes del transbordador, el Congreso ha asegurado el beneficio de los principales contratistas de la lanzadera. «Una vez más, Boeing habrá hecho su agosto», asegura Peter Wilson, analista de investigación en defensa de la Corporación RAND. Otros sostienen que reciclar la lanzadera convertirá al SLS en un «cohete de Frankenstein», una amasijo de piezas procedentes de un programa ya extinto. El uso de los cohetes adosados del transbordador ya ha causado problemas con el aislamiento térmico, por ejemplo.

Las estimaciones sobre el coste final del SLS muestran variaciones más que notables. La NASA ha anunciado públicamente que el primer lanzamiento costará 18.000 millones de dólares: 10.000 para el cohete, 6000 para la cápsula tripulada y 2000 para adaptar Cabo Cañaveral, en Florida, a las necesidades del vehículo. (Se da la casualidad de que Bill Nelson, senador por Florida, es otro gran partidario del SLS.) Sin embargo, la filtración de un informe interno reveló una previsión de gasto de 60.000 millones para los próximos diez años. Otras estimaciones sugieren que llevar astronautas a Marte podría acabar costando un billón de dólares. El objetivo declarado de la NASA se sitúa en 500 millones de dólares por lanzamiento, pero otras fuentes han elevado ese gasto hasta los 14.000 millones una vez se incluyan todos los desembolsos del programa.

Los críticos insisten en que el Gobierno y la opinión pública nunca compartirán ese entusiasmo por la exploración espacial si el SLS se lleva por delante cientos de miles de millones de dólares. Varios análisis, incluido un estudio interno de la NASA, han sugerido que para llegar a Marte y al espacio interplanetario no haría falta un cohete de carga pesada. Resultaría más barato emplear vehículos menores, semejantes al Delta IV, que durante una década se usó para lanzar satélites, y utilizarlos para trasladar a una órbita baja el combustible y los componentes necesarios para construir un cohete interplanetario desde allí.

PROGRAMAS ESPACIALES

Cohetes pasados y futuros

Durante las décadas posteriores al último lanzamiento del Saturno V, en 1973, la NASA optó por construir vehículos menores y más ligeros, incapaces de enviar seres humanos al espacio interplanetario. Dado que ahora Marte figura entre los objetivos de la agencia, la NASA ha comenzado a construir el Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS, *amarillo*), una serie de cohetes para vuelos tripulados con mayor empuje que el Saturno V.





VARIOS SEGMENTOS CILÍNDRICOS unidos servirán como cobertura de la etapa central del SLS. En su interior, un tanque de hidrógeno líquido y otro de oxígeno líquido transportarán el combustible del cohete. En la Planta de Montaje de Michoud, los ingenieros de la NASA construyen cilindros de prueba para evaluar la resistencia de los componentes.

Otros opinan que, si realmente hace falta un cohete gigante, el trabajo podría transferirse al sector privado. SpaceX, la compañía fundada por el icono de Silicon Valley Elon Musk, ya ha contratado con la NASA para transportar carga al espacio en sus Falcon 9. «El SLS no supone más que añadir pequeñas mejoras a una tecnología desarrollada hace 40 años», sostiene James Pura, presidente de la Fundación Frontera del Espacio, un grupo de apoyo a la exploración espacial. «La NASA debería comunicar a la industria privada qué clase de carga útil quiere enviar al espacio interplanetario, ofrecer una financiación fija y dejar que empresas como SpaceX construyan el vehículo». SpaceX está desarrollando un cohete de carga pesada con 27 motores, semejante al SLS, y ya trabaja en motores más potentes que, si tienen éxito, harían que el vehículo superase las prestaciones del mayor de los SLS. Además, SpaceX está diseñando todos sus componentes para que sean reutilizables; en cambio, el SLS es desechable en su totalidad.

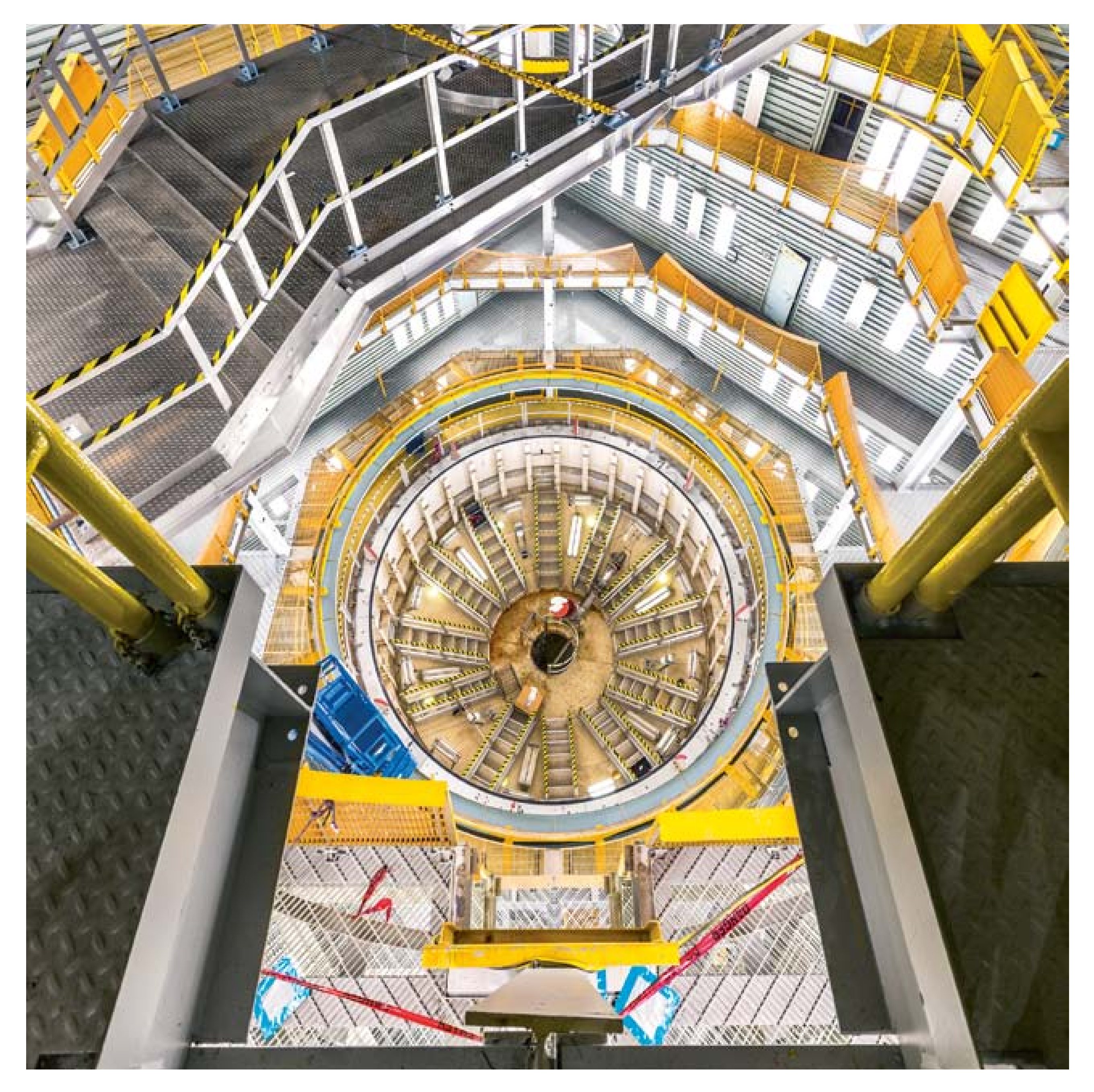
A pesar de todo, la planificación del SLS sigue adelante. En 2018, un primer vuelo enviará una cápsula *Orion* sin tripulación hasta más allá de la Luna. Pocos años después, un segundo vuelo aún sin fecha oficial hará lo mismo con astronautas a bordo, lo que supondrá enviar seres humanos más lejos de la Tierra que nunca. Lo que suceda después quedará en manos de un nuevo Congreso y un nuevo presidente, pero por ahora ya hay planificada una visita tripulada a un asteroide para mediados de la década de 2020 y una misión humana a Marte para el decenio de 2030.

LA FÁBRICA DE COHETES

La NASA prueba sus cohetes de mayor tamaño en el Centro Espacial Stennis, situado en medio de una red de lagos, ríos, pantanos y canales en el extremo más meridional del estado de Misisipi. Mientras nos ponemos los cascos y los chalecos de seguridad, Tom Byrd, que hasta su jubilación en enero fue subgerente de la NASA en el centro, explica que existen tres razones para su cercanía al agua. Las actividades que se llevan a cabo en Stennis necesitan acceso a grandes barcazas, conocimientos en construcción naval y a una manera sencilla de enfriar los gigantescos bloques de metal, que en ocasiones alcanzan temperaturas próximas a las que reinan en la superficie del Sol.

Cada banco de pruebas consta de una enorme estructura de metal y cemento que recuerda a la sección transversal de un gigantesco carguero oceánico. Ascendemos por uno de ellos y llegamos a una sala de control que, con sus manómetros de vapor y sus diales anticuados, no desentonaría en una central eléctrica soviética de los años cincuenta. Al preguntar por qué no han sido reemplazados por dispositivos digitales, recibo una respuesta que acabará por convertirse en un mantra: ha llevado décadas conseguir que este equipo funcione bien, a pesar de dificultades insondables e innumerables fallos técnicos; así que, ¿por qué tocarlo?

Desde la cima del banco de pruebas, en cambio, puede verse que en Stennis no faltan las actualizaciones. Los canales y las carreteras están siendo reformados para que puedan soportar cargas más pesadas. Y los bancos de pruebas también, ya que el SLS los someterá a tensiones mayores que cualquier otro cohete anterior. Las fuerzas que deben tolerar son incluso mayores que las de un lanzamiento real, ya que un cohete en un banco de pruebas no puede escapar de su propia columna de gases, explica Byrd. Durante un ensayo de puesta en marcha de unos nueve minutos de duración, miles de inyectores disparan chorros de agua a alta presión sobre las paredes del banco de pruebas. Ello no tiene por objeto refrigerarlo, sino amortiguar las violentas vibraciones que, de lo contrario, podrían destruir toda la



EN UN BANCO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICO de Michoud, los ingenieros introducen agua en el tanque de oxígeno líquido para comprobar su estanqueidad. Cuando el cohete esté montado por completo, el tanque de oxígeno se situará sobre otro mucho mayor de hidrógeno líquido.

estructura. Ya antes del SLS existía la prohibición de levantar construcciones privadas a menos de 13 kilómetros de los bancos de pruebas, ya que podrían venirse abajo como consecuencia de las ondas acústicas generadas durante los ensayos. Ahora, los motores del SLS proporcionarán el mayor empuje a un cohete jamás registrado sobre la superficie del planeta.

Justo al otro lado de la frontera entre Misisipi y Luisiana se halla el complejo de Michoud. A diferencia de Stennis, que se encuentra aislado, Michoud se alza en mitad de una zona industrial de las afueras de Nueva Orleans. En cierto modo parece una fábrica como las demás, con estaciones de soldadura, montacargas, grúas y cajoneras industriales, solo que mucho mayor.

El interior de Michoud reluce. Visitar sus instalaciones es ver cómo se llena minuto a minuto de nuevo equipamiento: altísimos brazos robóticos que se mueven a una velocidad asombrosa, plataformas rodantes y manipuladores mecánicos que llevan componentes de toneladas de peso de una estación a otra, y sistemas de control de piezas que aseguran que en un motor integrado por cientos de miles de ellas no sobra ni falta ninguna. Para fabricar una máquina como el SLS, la tolerancia

a los errores de montaje debe ser mínima. «Si el sistema de control de piezas indicase que sobra una de estas diminutas arandelas», señala Patrick Whipps, uno de los responsables de la NASA en Michoud, «todo el montaje se detendría hasta que la encontrásemos».

Buena parte de las piezas que formarán parte de los cohetes que se construyan aquí han sido diseñadas para otros vehículos. «En el SLS no habrá muchos componentes específicos», apunta William Gerstenmaier, el gerente de la NASA que lidera el programa para el envío de misiones tripuladas al espacio. Sin embargo, los nuevos métodos y sistemas de fabricación deberían abaratar la construcción de esos componentes, añade Whipps. Dichas mejoras incluyen una máquina de soldadura por fricción-agitación del tamaño de un depósito municipal de agua, la mayor de este tipo que existe en el mundo. Las inmensas secciones de aluminio del cohete pueden depositarse enteras en este leviatán, donde quedan unidas por medio de herramientas rotativas.

Cuando se trata de enviar seres humanos al espacio interplanetario a lomos de una explosión controlada a duras penas, una cierta dosis de conservadurismo no viene mal

El SLS también supera al transbordador en otros aspectos. Para analizar las tensiones mecánicas por bataneo (*buffeting*), así como otras inestabilidades aerodinámicas que el SLS sufrirá durante su ascensión a través de la atmósfera, la NASA empleó un programa informático de dinámica de fluidos de última generación. Sin él, habría sido necesario rediseñar todo el cohete a fin de proporcionarle una mayor resistencia mecánica para abarcar un margen de error muy superior. Además, gracias a una nueva aviónica y a unos controladores digitales basados en circuitos integrados mucho más avanzados que los del transbordador espacial, los instrumentos de control automatizado del vuelo y los motores podrán reaccionar con mucha mayor rapidez ante cambios repentinos y situaciones peligrosas.

Aunque los primeros cuatro vuelos del SLS se llevarán a cabo con motores del transbordador, a partir de 2020 se necesitarán otras versiones. Para producir los miles de álabes del tamaño de una moneda que requerirán los nuevos motores, la NASA está empleando una técnica de soldadura por láser que moldea el metal en polvo y le confiere la forma correcta. Gracias a ello, el tiempo necesario para fabricar los álabes de un motor se reducirá de un año a un mes. «Estamos usando el control por ordenador en todas las partes del proceso para minimizar los costes de mano de obra y aumentar la precisión», explica Gerstenmaier.

A FAVOR DEL SLS

Cuando el programa del SLS opere a pleno rendimiento, el objetivo consistirá en producir al menos dos cohetes al año y, si es posible, llegar hasta cuatro. En la industria aeroespacial, eso equivale a una producción en masa. Pero todo quedará en punto muerto si la NASA no puede convencer a la opinión pública estadounidense de que el SLS merece la pena.

Las dos objeciones más extendidas son que 18.000 millones de dólares suponen demasiado dinero para invertirlo en un cohete, y que para hacer ciencia no hace falta enviar seres humanos, sino que basta con robots y sondas espaciales. Ambos reparos se reducen a una cuestión de perspectiva. Dieciocho mil millones de dólares no es tanto si hablamos de enviar astronautas a otro planeta: la cifra apenas representa un tercio más del coste del Big Dig (el «Gran Túnel») proyectado en Boston para descongestionar el tráfico. Es fácil insistir en que hay formas más baratas de conseguirlo, pero los antecedentes de éxito y seguridad de la NASA han puesto el listón muy alto. No parece probable que la opinión pública estadounidense esté dispuesta a tolerar un mayor riesgo de catástrofes para ahorrarse un dinero que no pasa de unas pocas milésimas del presupuesto federal.

En lo que respecta a las sondas y robots, a menudo se argumenta que el balance científico de una misión tripulada suele ser mayor que el aportado por una sonda o un vehículo explorador. Pero la verdadera justificación para enviar astronautas al espacio es otra: expandir el hábitat de la raza humana.

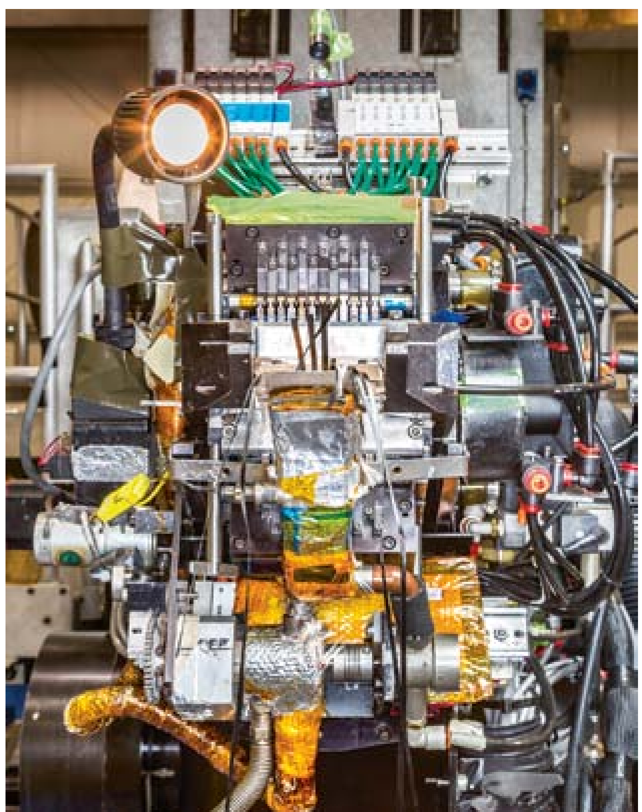
El SLS cuenta con muchos partidarios. Entre ellos se encuentran la directiva actual y el personal de la NASA, varios expertos en ciencias del espacio y una fracción cada vez mayor de la población estadounidense, que el pasado mes de diciembre se emocionó con el impecable vuelo de prueba de la cápsula *Orion* [*véase* «Un vuelo de prueba crítico para la NASA», por Clara Moskowitz; Investigación y Ciencia, diciembre de 2014]. Los expertos que figuran entre los defensores del SLS pueden discutir fácilmente punto por punto las objeciones lanzadas por los críticos.

¿Podrían emplearse cohetes menores para transportar los componentes y el combustible hasta una órbita baja y realizar allí el montaje? Gerstenmaier calcula que una misión tripulada a Marte necesitaría unas 500 toneladas de material, una carga que el SLS podría llevar en cuatro lanzamientos. En cambio, un Delta IV lleno hasta los topes requeriría al menos dos docenas de viajes. Gerstenmaier añade que cada lanzamiento incrementa el riesgo de la misión, ya que el momento más peligroso tiene lugar durante el primer minuto de vuelo. Y una estrategia basada en múltiples lanzamientos también sería más propensa a sufrir retrasos, ya que las demoras entre uno y otro siempre acaban acumulándose. «Para construir la Estación Espacial empleamos un gran número de lanzamientos con el transbordador. Al final, tardamos décadas», argumenta.

En cualquier caso, Gerstenmaier opina que el mayor inconveniente sería la gran cantidad de trabajos de construcción que tendrían que realizarse en órbita; entre ellos, los necesarios para fabricar hábitats, vehículos interplanetarios y depósitos de combustible. Dada la limitada experiencia del sector en el delicado arte de construir en mitad del espacio, la tarea se antoja abrumadora. «Es inevitable que algunas piezas no funcionen correctamente, en cuyo caso habría que repararlas desde allí. Eso añade una complejidad y un riesgo enormes», señala. Por otro lado, la sencilla geometría del SLS permitiría acomodar en su interior cargas de hasta 10 metros de diámetro y difíciles de embalar, como antenas y paneles solares. En cohetes menores, esas piezas tendrían que plegarse con sumo cuidado, lo que las haría más vulnerables al daño o al deterioro.

Otra gran ventaja de emplear cohetes pesados reside en que parte del empuje adicional que necesitan estos grandes artefactos puede aprovecharse para lograr velocidades mayores, con






LOS TRABAJADORES DE MICHOUD usan una máquina ensambladora de segmentos (*arriba a la izquierda*) para fabricar los anillos que empalmarán las cúpulas y los cilindros. La «lata de cerveza» (*arriba a la derecha*) mantiene en posición los segmentos cilíndricos para su puesta a prueba. Una máquina fabrica la envuelta de fibra de carbono de la cápsula *Orion*, que el SLS transportará al espacio (*abajo a la izquierda*). Los operarios levantan un panel de aluminio sobre la herramienta usada para ensamblar la cúpula de la etapa principal (*abajo a la derecha*).

lo que la nave llegaría antes a su destino. Este aspecto resulta crucial en un vuelo tripulado a Marte, donde la exposición a la radiación y la disponibilidad de suministros establecen unos límites muy estrictos para la duración de la misión. Las exploraciones robóticas a lugares distantes también se beneficiarán, ya que la planificación de misiones sucesivas debe esperar a que se reciban los datos de sus predecesoras para maximizar el rendimiento científico. Y, debido a su potencia, el SLS podría enviar misiones al espacio interplanetario usando su propio combustible, sin tener que depender de la asistencia gravitatoria ejercida por los planetas, como ocurrió con las misiones Voyager y Galileo.

«El SLS reduciría el tiempo necesario para llegar a Europa de seis años a dos años y medio», señala Scott Hubbard, catedrático y consultor de astronáutica y aeronáutica en Stanford. Si a esta rebaja del tiempo de tránsito se le añade la posibilidad de transportar cargas mayores y la flexibilidad para embalarlas, las ventajas de un cohete de carga pesada se tornan obvias. Eso explica por qué tanto China como Rusia están trabajando en diseños similares al del SLS.

En cuanto a la participación de empresas como SpaceX, los viajes interplanetarios no representan un terreno tan natural para el sector privado como el transporte de carga a la ISS. Ni hay un mercado interplanetario ni se prevé que aparezca uno —más allá del puñado de misiones que la NASA ha planificado para el SLS—, lo que impediría a SpaceX rentabilizar los costes de desarrollo recurriendo a varios clientes comerciales, como hace con los cohetes menores. Y, sin esa ventaja, SpaceX no se encontraría en mejor posición que Boeing, Lockheed Martin o cualquier otro contratista habitual, asegura Scott Parazynski, antiguo astronauta de la NASA con cinco misiones en el transbordador a sus espaldas. «Todos ellos son contratistas muy competentes; no veo a SpaceX en una posición radicalmente distinta», explica.

Aferrarse a lo ya conocido en lugar de innovar tal vez garantice el fracaso en sectores como la telefonía móvil, la informática o la automoción. Pero, cuando se trata de enviar seres humanos al espacio interplanetario a lomos de una explosión controlada a duras penas, una cierta dosis de conservadurismo no viene mal. Varios vehículos de SpaceX han estallado o perdido el control, algo esperable cuando se están probando nuevos diseños. El pasado mes de octubre, una operario falleció cuando una nave construida por la compañía Virgin Galactic para llevar turistas al espacio suborbital se estrelló durante un vuelo de prueba. Y aquel accidente sucedió solo tres días después de que estallase un cohete no tripulado de la compañía Orbital Sciences destinado a la ISS.

Tales siniestros ponen de manifiesto que, a pesar de décadas de experiencia, la ingeniería espacial entraña grandes dificultades. Comporta un elevado riesgo de pura catástrofe. Esa es una de las razones por las que los dirigentes en la Fundación Inspiración hacia Marte, una organización privada que intenta allanar el camino hacia el planeta rojo, hayan dejado de lado su escepticismo inicial sobre el SLS. «El proyecto fue acusado desde el primer día de ser un cohete sin destino», apunta Hubbard. «Pero ahora se han propuesto una serie de misiones defendibles y bien definidas. Es hora de apoyarlo y de aunar esfuerzos para que vaya tomando forma.»

IMPULSO FINAL

Una fría noche del pasado mes de enero, uno de los gigantescos motores del Centro Espacial Stennis se convirtió en una bola de fuego durante 500 segundos. Se trataba del primer ensayo de un R-25, uno de los motores del transbordador, desde 2009. Todo salió a la perfección.

Si los ensayos continúan con éxito, tal vez el tiempo comience a correr a favor del SLS. Cuanto más dure el programa —y siempre que el presupuesto y los plazos se cumplan—, más podrá entenderse como una prueba de su propia viabilidad. En tres años, el proyecto se ha deslizado con suavidad de los informes sobre el diseño a las primeras etapas de fabricación. Se trata de un progreso muy rápido para un cohete nuevo, de gran tamaño y destinado a transportar astronautas. Por ahora solo se han presentado algunos fallos técnicos. Uno de los peores fue el relacionado con el aislamiento térmico, mencionado más arriba, pero bastó una capa adhesiva para solucionarlo.

Durante los próximos años, con otros presidentes y otros congresistas, podrá ocurrir cualquier cosa, asegura Joan Johnson-Freese, profesora de la Escuela de Guerra Naval de los Estados Unidos y especialista en cuestiones espaciales. Quizás el Gobierno estadounidense cambie de opinión y decida dejar Marte de lado para concentrarse en una base más cercana a nuestro planeta. «Algunos en Washington tienen una nostalgia casi inmoral por la Luna», señala la experta. Otros piensan que, al menos de momento, la NASA debería olvidarse de la Luna y de Marte y apuntar a los asteroides. Estos objetos no solo permiten estudiar el origen del sistema solar, sino que llegar a ellos podría servir para aprender a desviar o destruir alguno que se dirija hacia la Tierra.

A pesar de todo, Marte sigue seduciendo a un gran número de personas. En los últimos tiempos, esa fascinación ha aumentado debido a que cada vez más gente lo ve como una meta alcanzable a lo largo de su vida. «A todos nos gustaría vernos ir allí», confiesa Parazynski, «otras misiones parecen una distracción». El exastronauta alberga dudas sobre el SLS, pero no porque piense que se trata una forma pésima de llegar a Marte. Le preocupa que, dado que el proyecto no será barato ni su ejecución inmediata, acabe por abandonarse antes de llegar al planeta rojo.

Por el momento no parece que haya grandes obstáculos que se interpongan en el camino del SLS. Por sí sola, esa razón —que no puede esgrimirse para ninguna otra propuesta de enviar una nave a Marte— tal vez baste para garantizar que el proyecto siga su curso. Es cierto que fue improvisado por el Congreso estadounidense, y también que carece del brío innovador de otras estrategias. Pero goza de presupuesto suficiente para el futuro próximo, y todo indica que funcionará tal y como está planeado. Eso debería bastar para que el SLS sea el cohete que por fin lleve astronautas a Marte. Si lo consigue, las críticas caerán muy pronto en el olvido.

PARA SABER MÁS

Pale blue dot: A vision of the human future in space. Carl Sagan y Ann Druyan. Random House, 1994.

NASA's human path to Mars. William Gerstenmaier. NASA, 2014. **www.nasa.gov/sites/default/files/files/20140429-Gerstenmaier-Human-Path-Mars.pdf**

NASA Strategic Plan 2014. NASA, 2014. **www.nasa.gov/sites/default/files/files/FY2014_NASA_SP_508c.pdf**

EN NUESTRO ARCHIVO

A la Luna y más allá. Charles Dingell, William A. Johns y Julie Kramer White en *IyC*, diciembre de 2007.

Aerloíneas espaciales. David H. Freedman en *IyC*, febrero de 2011.

Rumbo a Marte. Damon Landau y Nathan J. Strange en *IyC*, febrero de 2012.

Investigación espacial de bajo coste. S. Alan Stern en *IyC*, julio de 2013.



SALUD PÚBLICA

FRENO AL DENGUE

La vacunación del mosquito transmisor con una bacteria común se convierte en una nueva táctica contra la enfermedad

Scott O'Neill





Scott O'Neill es decano de la Universidad de Monash en Australia y director de Eliminate Dengue, un consorcio internacional para la investigación de *Wolbachia*.



L MEJOR MOMENTO DEL DÍA PARA SOLTAR MOSQUITOS EN EL NORTE de Australia es a media mañana. Más tarde, el viento los dispersaría y se esfumaría toda esperanza de que hallaran pareja. Si se hiciera más temprano, el personal que transporta los recipientes llenos de mosquitos hasta los puntos de suelta tendría que percibir horas extras. Así que, en una sofocante mañana de enero, en plena canícula austral, me puse al volante de mi furgoneta blanca en compañía de miles de mosquitos encerrados en vasos de plástico en el asiento trasero.

En 2011, una vez a la semana durante tres meses, hicimos trayectos como el relatado para liberar mosquitos. Nos concentramos en dos barriadas de la ciudad de Cairns, un frecuentado destino turístico cercano a la Gran Barrera de Coral. En una cuarta parte de las casas, cuyos residentes habían accedido a participar en el experimento, tomábamos un vaso de la furgoneta, lo abríamos y soltábamos el medio centenar de mosquitos del interior.

No se trata de los mosquitos corrientes que revolotean en su jardín. Cada uno está infectado con un microbio llamado *Wolbachia,* una bacteria que habita en células de insectos. El rasgo que más nos interesa de *Wolbachia* es su capacidad de paralizar la multiplicación del virus del dengue en el cuerpo del mosquito. Como el virus no puede reproducirse, el mosquito no puede transmitirlo con su picadura y la enfermedad no se propaga.

Los mosquitos infectados con la bacteria suponen una táctica indirecta para luchar contra el dengue, pero lo cierto es que no hay muchas más opciones. El dengue, apodado en inglés «fiebre rompehuesos» por el intenso dolor muscular y articular que causa, afecta a 390 millones de personas cada año. Sin cura ni tratamiento, la estrategia principal ha consistido en combatir a *Aedes aegypti,* el mosquito transmisor del virus. Pero los insecticidas al uso, como el temefós, han perdido gran parte de su eficacia debido a que los mosquitos han desarrollado resistencia al compuesto. Las mosquiteras también resultan inútiles porque *A. aegypti* se alimenta durante el día. En la actualidad, una de las herramientas más prometedoras para frenar la propagación del dengue —y tal vez también la del paludismo y de otras enfermedades transmitidas por la picadura de estos insectos— parece ser la diseminación de *Wolbachia* entre los mosquitos silvestres.

Wolbachia no es un candidato evidente como medio de lucha contra el dengue. De natural, no se halla en los principales mosquitos transmisores de la enfermedad. De hecho, es preciso infectar los mosquitos artificialmente, en el laboratorio. En otras palabras, con *Wolbachia* inmunizamos los mosquitos contra el dengue y, después, los liberamos con la esperanza de que traspasen la bacteria a su descendencia. Aquella resulta benigna para los mosquitos y para el entorno, aunque tal vez reduzca el tamaño de la puesta. Pero las ventajas que puede reportar son indudables: si los mosquitos infectados con *Wolbachia* acaban predominando, la incidencia del dengue en la población humana debería descender.

CONTROL DE PLAGAS

El mosquito es uno de los seres más mortíferos del planeta. La fiebre amarilla, transmitida también por *A. aegypti,* mató a más soldados estadounidenses que el fuego adversario durante la guerra hispano-estadounidense de 1898. El paludismo, contagiado por un protozoo que parasita los mosquitos, mató a 627.000 personas en 2012. Ahora *A. aegypti* está propagando con rapidez el dengue por todo el globo. Casi la mitad de la humanidad corre cierto riesgo de contraer la enfermedad, según la Organización Mundial de la Salud. La especie*,* reconocible por las franjas blancas de las patas y el dibujo en forma de lira del tórax, puede criar en cualquier charco de agua, hecho que dificulta muchísimo su control. Habita en las regiones de clima tropical y subtropical del planeta: África, América, el este de la cuenca mediterránea, el sudeste asiático y el Pacífico occidental. Sin embargo, el dengue no es natural en él: el mosquito contrae la enfermedad como nosotros.

EN SÍNTESIS

Se está investigando el modo de combatir la fiebre del dengue con la ayuda de *Wolbachia,* una bacteria común que paraliza la multiplicación del virus en el mosquito transmisor. Es una de las escasas armas disponibles contra esta enfermedad.

La bacteria abunda en muchos insectos, pero el mosquito *Aedes aegypti*, el principal vector del dengue, no es uno de sus hospedadores naturales. Es preciso infectar el mosquito en el laboratorio y liberarlo después.

Se pretende que, en la naturaleza, los mosquitos infectados con *Wolbachia* se apareen y transfieran la bacteria a las generaciones futuras. Si el método funciona, muchísimos mosquitos silvestres acabarán infectados y no contagiarán el dengue a los humanos.

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE BILL MAYER

EL MOSQUITO *AEDES AEGYPTI* (*abajo*) **es el principal vector del dengue, pero los especímenes infectados con la bacteria *Wolbachia* no transmiten el virus. Los científicos crían estos mosquitos en el laboratorio y los sueltan en la naturaleza (*derecha, abajo*), donde desplazan a los insectos no infectados y frenan así la propagación del dengue.**









JAMES GATHANY, GETTY IMAGES (*mosquito rojo*); CHRISTOPHE SIMON, GETTY IMAGES (*larvas, jaulas y suelta de mosquitos*)

El mecanismo de la infección por dengue resulta sencillo. Las hembras pican a las personas porque necesitan las proteínas de la sangre para engendrar los huevos. (Los machos no pican.) Si una de ellas pica a un enfermo y al cabo de entre 8 y 12 días (plazo de multiplicación del virus) hace lo propio con otra persona, contagia el dengue a esta nueva víctima cuando se nutre de su sangre. *Wolbachia* trastoca este proceso impidiendo la multiplicación.

Descubierta en 1924 en el curso de disecciones de mosquitos domésticos, el interés por esa bacteria decayó hasta la década de los setenta, cuando las investigaciones revelaron que en determinadas circunstancias podía abolir la puesta de los mosquitos, lo que la convirtió en un medio potencial para el control de plagas. En los años noventa se supo que algunas cepas de *Wolbachia* también acortaban la vida del mosquito, otro modo más para limitar la transmisión de enfermedades a través de los insectos.

Mi primer encuentro con *Wolbachia* se remonta a mi época de doctorando, a mediados de los años ochenta. En ese tiempo me preguntaba si sería factible su uso para impedir que los mosquitos contagiaran enfermedades humanas. Si se pudiera acortar la esperanza de vida de los insectos siquiera un poco, la capacidad para propagar males se reduciría notablemente.

El inconveniente —siempre lo hay— era la escasa afinidad de *Wolbachia* por *A. aegypti*. La bacteria se halla en hasta el 60 por ciento de las especies de insectos (algunas de ellas corresponden a mosquitos que también se alimentan de sangre humana), pero la infección no franquea con facilidad las barreras que separan las especies. El reto consistía en hallar un modo de transferir cepas de *Wolbachia* procedentes de otro insecto, la mosca de la fruta, al mosquito del dengue. El proceso resultó tedioso y nos llevó más de una década.

CÓMO INFECTAR LOS MOSQUITOS

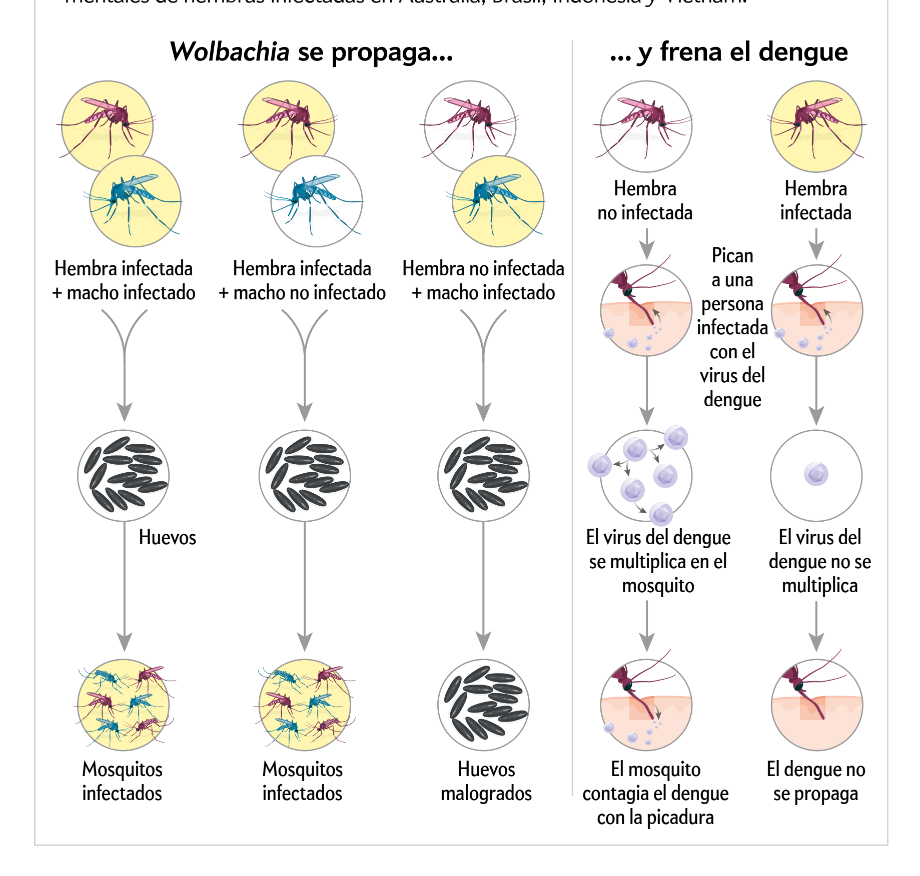
Imaginemos que tuviéramos que pinchar un globo con una aguja y sacarla sin reventarlo. Este símil resume a la perfección el proceso necesario para infectar los huevos de mosquito con *Wolbachia*. En el laboratorio, nuestro equipo emplea agujas microscópicas para extraer el microbio de la mosca de la fruta e inyectarlo directamente en los huevos de mosquito. Al principio, estos reventaban uno tras otro como si se tratara de globos. Solo al cabo de miles de intentos conseguimos salir airosos.

Una vez que logramos infectar los huevos, tuvimos que superar nuevos obstáculos. *Wolbachia* solía desaparecer del

FUNDAMENTO

Cómo *Wolbachia* combate el dengue

No existe vacuna contra esta enfermedad, pero la infección de los mosquitos con una bacteria llamada *Wolbachia* impide la transmisión del dengue a través de su picadura. El microbio infecta los mosquitos machos y hembras: estas últimas ponen huevos que albergan la bacteria y, cuando las hembras normales se aparean con machos infectados, los huevos no eclosionan. En estos momentos se están realizando sueltas experimentales de hembras infectadas en Australia, Brasil, Indonesia y Vietnam.



LUCY READING-IKKANDA

mosquito en un par de generaciones, demasiado rápido para que se diseminara en el medio, como pretendíamos. Acabamos averiguando que era preciso preparar el microbio antes de inyectarlo en el insecto para que se acostumbrara a su nuevo anfitrión, habituado como estaba a vivir en la mosca de la fruta. Para ello, extrajimos *Wolbachia* de moscas y las cultivamos en estirpes de células de mosquito. Por fin, en 2005, lo logramos: infectamos mosquitos con *Wolbachia* y vimos que las generaciones de bacterias se sucedían una tras otra, hasta 13 en total. Desde entonces, el microorganismo ha proliferado en todas las generaciones posteriores. Y, según habíamos esperado, por lo menos una cepa de la bacteria acortaba la vida de *A. aegypti*.

Pero resulta que *Wolbachia* combate al dengue aún mejor de lo que pensábamos. Por razones que no acabamos de entender, el virus no crece bien en los mosquitos infectados por la bacteria. Lo descubrimos hace unos años, después de inocular con éxito *Wolbachia* en *A. aegypti*. En otro proyecto en el que participaba, observamos que la bacteria bloqueaba también la replicación del virus *Drosophila* C en las moscas de la fruta, mortal para ellas. Mi equipo inoculó directamente el dengue a los mosquitos portadores de *Wolbachia* y, para nuestro gozo, el virus no se multiplicó. Reprodujimos el experimento varias veces, en docenas de mosquitos cada vez, con idéntico resultado.

Por entonces usábamos una cepa de *Wolbachia* que impedía la transmisión del dengue pero no acortaba la vida del mosquito. Pero, al fin y al cabo, queremos que este último viva todo lo posible y ponga el mayor número de huevos infectados con *Wolbachia*. Se sabe, desde mi tiempo como estudiante universitario, que las hembras transfieren la bacteria a casi toda la descendencia. En pocas generaciones, la bacteria se ha propagado a la práctica totalidad de la población de mosquitos donde se ha introducido. Uno de nuestros experimentos en el norte de Australia demostró que, si se liberaba una decena de insectos por hogar y semana a lo largo de diez semanas, más del 80 por ciento de los mosquitos silvestres de la zona acababan infectados con *Wolbachia*, porcentaje que se mantenía dos meses después de concluir la suelta. Dado que la bacteria se transmite bien a las nuevas generaciones de insectos, no tuvimos que hacer nuevas sueltas. *Wolbachia* se perpetuó por sí sola.

EN LA NATURALEZA

Antes de liberar los mosquitos infectados con *Wolbachia* en la naturaleza, tuvimos que aclarar múltiples inquietudes de la población. Durante algunos meses, llamamos puerta por puerta a los hogares afectados con el fin de obtener su consentimiento. Organizamos reuniones informativas formales y charlas improvisadas en el exterior de los centros comerciales. Y las autoridades federales australianas supervisaron la seguridad de nuestro método antes de autorizar la suelta.

Para los humanos, *Wolbachia* no supone ninguna amenaza aparente. Nuestros experimentos de laboratorio han comprobado que la bacteria no puede transmitirse a nuestra especie, porque resulta demasiado voluminosa para atravesar el conducto salival del mosquito y entrar en nuestro torrente sanguíneo. Asimismo, en las pruebas de seguridad con voluntarios para detectar anticuerpos no se han observado indicios de su presencia después de que estos soportaran picaduras durante tres años. El personal del laboratorio y otros voluntarios se arremangaban con frecuencia los brazos antes de introducirlos durante 15 minutos en jaulas repletas de mosquitos, que se atiborraban a placer.

Tampoco hay pruebas de que *Wolbachia* perjudique el entorno. Desde que comenzamos a soltar mosquitos portadores de la bacteria en 2011, hemos estudiado los animales y los insectos con los que estos entran en contacto y solo la hemos localizado en células de insectos y de otros artrópodos. Además, no pensamos que llegue a sobrevivir en el torrente sanguíneo humano o de otros mamíferos, aunque consiga penetrar en él. Es más, la bacteria se halla de por sí en otras muchas especies de mos-

quito, entre ellas algunas que se alimentan de sangre humana. Las pruebas realizadas con arañas y salamanquesas que han devorado mosquitos infectados con *Wolbachia* no han revelado ningún efecto nocivo por la exposición ni rastro de la bacteria en los tejidos de esos animales.

Antes de proceder a la primera suelta de mosquitos con *Wolbachia* en 2011, encargamos una evaluación independiente del riesgo a la Organización para la Investigación Industrial y Científica de la Mancomunidad de Naciones (CSIRO, por sus siglas en inglés), la agencia nacional de ciencia de Australia. Equipos de especialistas analizaron los riesgos de la actuación, desde el posible impacto ecológico hasta el efecto en la población humana. La agencia escrutó los estudios disponibles y se entrevistó con expertos en biología evolutiva. Se barajaron todo tipo de cuestiones difíciles: las variaciones en la densidad de mosquitos, la posibilidad de que el virus mutase, las molestias causadas por el incremento de los insectos y el cambio en la percepción pública sobre los peligros del dengue. Pero el informe final de CSIRO llegó a la conclusión de que la liberación de mosquitos con *Wolbachia* tendría un riesgo ínfimo para la población y el ambiente y lo valoró con el baremo más bajo.

El personal del laboratorio y otros voluntarios se arremangaban los brazos antes de meterlos 15 minutos en jaulas repletas de mosquitos, que se atiborraban a placer

WOLBACHIA SE GLOBALIZA

Además de los ensayos de campo que nuestro equipo lleva a cabo en Australia desde hace cuatro años, hay estudios en curso en Indonesia y Vietnam. El pasado septiembre iniciamos las sueltas de insectos en Brasil. Sabemos que *Wolbachia* puede colonizar poblaciones silvestres de mosquitos en pequeñas localidades; ahora vamos a intentar que lo haga en zonas más extensas. Ampliar la escala de la operación tal vez exija retocar la metodología. Por ejemplo, criar un gran número de mosquitos adultos infectados con *Wolbachia* resultaría demasiado laborioso. Por eso en Cairns estamos analizando la viabilidad de dispersar los huevos infectados.

Mientras tanto, otros especialistas están diseñando estrategias de control alternativas. Una de ellas aboga por la liberación de machos modificados genéticamente cuyos espermatozoides serían portadores de un gen letal. La descendencia de su apareamiento con hembras silvestres moriría. Se trata de una estrategia innovadora y poderosa, pero también costosa. Para que resultara eficaz a gran escala, sería necesario liberar ejemplares modificados de forma continuada; de lo contrario, los mosquitos normales de las cercanías acabarían repoblando la zona. Además, la técnica tropieza con una fuerte oposición de los detractores de la modificación genética.

En cambio, el control del dengue mediante *Wolbachia* solo exige una fuerte inversión inicial para adquirir los mosquitos infectados; después, todo el proceso rueda solo. Podría representar un modo relativamente económico de combatir el dengue, un aspecto importante en los países tropicales pobres, donde la enfermedad alcanza la mayor prevalencia. Otra ventaja de esta táctica es que no implica la modificación de genes, aunque todavía tardaremos años en convencer plenamente a la opinión pública de su inocuidad.

Pero todavía deberemos salvar otro obstáculo: cuantificar el descenso de los casos de dengue tras la introducción de *Wolbachia*. Este paso planteará varias dificultades. En las zonas donde trabajamos apenas existen estadísticas fiables sobre los pacientes con dengue y los índices de infección pueden variar mucho de un año a otro. Para verificar la eficacia del método habrá que comparar la incidencia de la enfermedad en las zonas donde se hayan liberado los mosquitos con *Wolbachia* con otras en las que no. Y ello exigirá tomar un gran número de muestras de sangre, una labor ardua.

Pero estamos convencidos de que todo ese esfuerzo merece la pena, y no solo para combatir el dengue. Estos mosquitos —o, mejor dicho, los microbios alojados en ellos— también parecen prometedores en la lucha contra otras enfermedades. Tenemos indicios de que *Wolbachia* podría mermar la transmisión de la fiebre chikunguña, que en julio del año pasado afectó por primera vez el territorio continental de EE.UU., así como la de la fiebre amarilla. También se están ensayando mosquitos infectados con *Wolbachia* para frenar el paludismo y la elefantiasis, una enfermedad desfigurante causada por vermes parásitos.

Esas nuevas observaciones resultan fascinantes. Pero, por el momento, nuestro grupo seguirá volcado en la evaluación del método contra el dengue. Nuestra investigación comenzó en este campo y es donde estamos más cerca de conseguir resultados tangibles. Esperamos que llegue el día en que la picadura de un mosquito no tenga más repercusión que una molesta hinchazón.

PARA SABER MÁS

Dietary cholesterol modulates pathogen blocking by *Wolbachia*. Eric P. Caragata en *PLOS Pathogens*, vol. 9, n.º 6, artículo n.º e1003459, junio de 2013. **journals.plos.org/plospathogens/article?id=10.1371/journal.ppat.1003459**

Limited dengue virus replication in field-collected *Aedes aegypti* mosquitoes infected with *Wolbachia*. Francesca D. Frentiu et al. en *PLOS Neglected Tropical Diseases*, vol. 8, n.º 2, artículo n.º e2688, febrero de 2014. **journals.plos.org/plosntds/article?id=10.1371/journal.pntd.0002688**

Modeling the impact on virus transmission of *Wolbachia*-mediated blocking of dengue virus infection of *Aedes aegypti*. Neil M. Ferguson et al. en *Science Translational Medicine*, vol. 7, artículo n.º 279ra37, marzo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El gen destructor. Bijal P. Trivedi en *IyC*, enero de 2012.

El dengue en Latinoamérica. Jorge R. Rey y L. Philip Lounibos en *IyC*, enero de 2012.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. **ASTRONOMÍA** Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA** Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION** Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA** Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA** Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS** Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA** El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **MEDIOAMBIENTE** Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS** Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. **LUZ Y TÉCNICA** La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. **ENERGÍA** Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

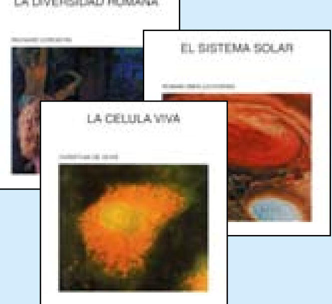
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro

(*) Disponible solo en formato digital



TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física

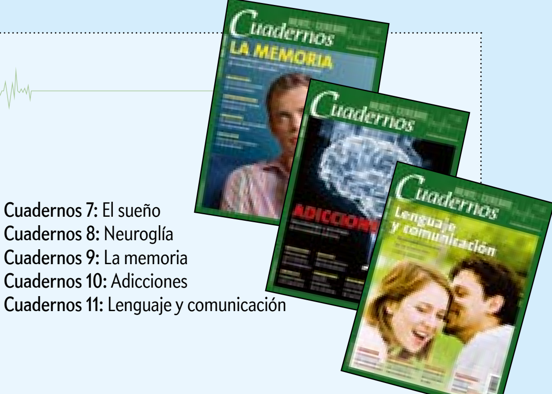
(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación



por Josep M. Trigo, Carles E. Moyano y Marina Martínez

Condritas carbonáceas, mensajeros del pasado

Las misiones espaciales de retorno de muestras de asteroides primitivos permitirán estudiar la infancia del sistema solar y el origen de la vida en la Tierra

El Sol y su entorno planetario nacieron hace 4600 millones de años. Los detalles de aquella época remota se encuentran escritos en los meteoritos, fragmentos rocosos llegados a la Tierra desde cometas y asteroides. En los menores de estos objetos (aquellos de menos de un centenar de kilómetros de diámetro), el calor producido por la desintegración de sus componentes radiactivos escapó al espacio sin llegar a fundir sus materiales primigenios, por lo que su composición ha permanecido prácticamente intacta desde la infancia del sistema solar. Los meteoritos procedentes de ellos se denominan condritas, ya que se caracterizan por la presencia de cóndrulos: pequeñas esferas ígneas formadas principalmente por silicatos cristalinos que, junto a otras inclusiones y granos metálicos, se encuentran envueltas en una matriz de grano muy fino.

Las condritas no solo son representativas de los cuerpos que dieron lugar a los planetas rocosos, sino que tal vez fuesen las que trajeron el agua y la materia orgánica a la Tierra. Algunas contienen hasta un 12 por ciento de agua y un 5 por ciento de carbono, razón por la que reciben el nombre de condritas carbonáceas. Estas rocas primigenias se antojan clave para entender el origen de los océanos y de la vida en la Tierra [*véase* «Meteoritos primitivos», por Alan E. Rubin; Investigación y Ciencia, abril de 2013]. Su análisis constituye uno de los objetos de estudio de nuestro grupo de investigación en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC), en Barcelona.

Aunque la observación telescópica de asteroides permite establecer vínculos genéricos entre los diversos grupos de condritas, su estudio detallado requiere analizar estas rocas en el laboratorio. Por ello resultan esenciales las misiones espaciales de retorno de muestras, cuyo objetivo consiste en viajar hasta ciertos asteroides tipo para extraer material y regresar con él a la Tierra. Estas misiones permitirán estudiar el papel de las condritas carbonáceas en el origen de la vida en nuestro planeta, el cual aconteció hace unos 3800 millones de años, justo tras un período conocido como Gran Bombardeo Tardío, en el que innumerables objetos de esta clase cayeron sobre nuestro planeta.

La carrera ya ha empezado. La NASA y la Agencia Espacial Japonesa han lanzado las misiones OSIRIS-REx y Hayabusa 2, las cuales tomarán muestras de los asteroides primitivos Bennu y 1999 JU3, respectivamente. Para no quedarnos atrás, la comunidad científica europea se ha organizado en torno a la misión Marco Polo 2D, que esperamos sea finalmente considerada por la Agencia Espacial Europea (ESA) para traer muestras del asteroide carbonáceo 2001SG286 o de algún otro de naturaleza primitiva y próximo a la Tierra. Cada uno de estos asteroides es sustancialmente distinto y constituye una fuente potencial de minerales diversos, por lo que su exploración reviste un enorme interés.

—Josep M. Trigo Rodríguez,
Carles E. Moyano Cambero
y Marina Martínez Jiménez
Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña

YOSHIKAWA MAKOTO/AGENCIA ESPACIAL JAPONESA (*Marco Polo*); JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ/CSIC/INSTITUTO DE ESTUDIOS ESPACIALES DE CATALUNA (*condrita*);

TOMA DE MUESTRAS IN SITU: Varias misiones de exploración de asteroides primitivos permitirán traer a la Tierra condritas carbonáceas para analizarlas en el laboratorio. En esta recreación artística, la sonda *Marco Polo*, una propuesta presentada ante la ESA, toma muestras en la superficie de un asteroide.

500 µm

MATERIA ORGÁNICA PRIMIGENIA: Los meteoritos procedentes de asteroides de poco tamaño conservan la composición del sistema solar primitivo. Estas imágenes en luz transmitida de una sección delgada de las condritas carbonáceas Allan Hills 77307 (*arriba*) y Elephant Moraine 96026 (*abajo*) muestran numerosos cóndrulos minerales (*inserciones brillantes*) insertados en una matriz rica en materia orgánica (*fondo oscuro*). Justo antes de que apareciese la vida en la Tierra, nuestro planeta sufrió un bombardeo masivo de rocas de este tipo.

500 µm

por Antoni Malet



Antoni Malet, doctor en historia de la ciencia por la Universidad de Princeton, es catedrático de esta disciplina en la Universidad Pompeu Fabra y presidente electo de la Sociedad Europea de Historia de la Ciencia.

Matemáticas y metafísica en la óptica de Kepler

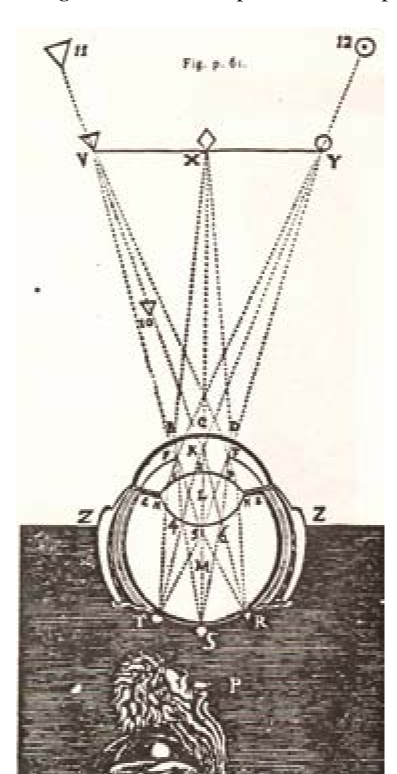
Las observaciones de eclipses antes del descubrimiento del telescopio llevaron a Kepler a interesarse por la óptica, ciencia que revolucionó. Explicó la formación de imágenes en la cámara oscura, se aproximó a la ley de la refracción y descubrió las propiedades ópticas del ojo humano

Johannes Kepler (1571-1630) es conocido por sus cruciales contribuciones a la revolución astronómica del siglo XVII. Sus tres leyes desempeñaron un papel fundacional en la explicación newtoniana de los movimientos planetarios. Sus aportaciones a la óptica, en cambio, son menos populares, si bien fueron equiparables, en importancia, a las leyes astronómicas.

Kepler ha sido durante mucho tiempo un autor maldito, poco reconocido por el gran público, con una imagen castigada por sospechas de misticismo e inclinaciones pseudocientíficas. Nada que ver con la figura de su casi exacto contemporáneo Galileo Galilei, héroe en el teatro y en el cine, arquetipo mítico del científico moderno. Sin embargo, las contribuciones de Kepler son de una enorme sofisticación y profundidad, y aplican de forma brillante la geometría a la resolución de problemas físicos —dentro de los marcos conceptuales de su tiempo.

Kepler llegó a la óptica a través del estudio de eclipses del Sol. Estamos en los últimos años del siglo XVI y aún no hay telescopios. La técnica de observación más común consiste en proyectar sobre un papel o tela blanca, en una habitación oscura y a través de un pequeño orificio, una imagen del astro. Aristóteles ya se había ocupado de este problema óptico: no importa cuál sea la forma del orificio, por él se proyectará una imagen simétrica y circular del Sol, o de los contornos del Sol visibles durante el eclipse. Es la «cámara oscura», un artificio muy admirado en la época —también como entretenimiento—, en el que se observa sobre una tela situada frente al orificio una imagen simétricamente invertida de lo que se encuentra delante del orificio en el exterior y bien iluminado. Nadie, desde Aristóteles, ha sido capaz de explicar el fenómeno, a pesar de que se han ocupado de él todos los escritores ópticos desde la Antigüedad hasta el Renacimiento. ¿Pueden extraerse conclusiones fiables de estas imágenes?

También las propiedades ópticas del ojo preocupan a los astrónomos. Existe una teoría geométrica de la visión humana generalmente aceptada en Europa entre 1200 y 1600. Imaginemos un ojo observando un cuadrado (una ventana cuadrada, por ejemplo). De cada punto del objeto emergen infinitos rayos de luz; cada uno porta una «especie» visual, pero solo uno llega perpendicularmente a la pupila. La bibliografía óptica de la Edad Media y del Renacimiento considera irrelevantes los rayos que no caen normales a la superficie externa del ojo. Se establece así una relación biunívoca entre los puntos del cuadrado y los puntos correspondientes de la pupila; una relación biunívoca que se prolonga hasta el cristalino, donde las «especies» dibujan el cuadrado observado. (La naturaleza de las «especies» visuales no se precisaba. Como los átomos en los siglos XVIII y XIX, eran un objeto científico mal definido pero de cuya existencia casi nadie dudaba.) El cristalino transmite estas especies visuales al nervio óptico, que las hace llegar al cerebro, siempre formando un cuadrado.



LA TEORÍA DE LA VISIÓN de Kepler, según se ilustra en *La dioptrique* (1637), tratado de óptica de René Descartes.

Esa era la teoría hegemónica de la visión, la que se enseñaba en las universidades de Europa mediante tratados de óptica muy populares en la Baja Edad Media, como el del monje polaco Witelo (1230-finales del s. XIII). De ahí que la gran obra de Kepler sobre óptica, de 1604, se titule *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur* o «Complementos a Witelo, en los cuales se estudia la parte óptica de la astronomía»; el título continúa «En especial, [trata] de la observación y medición con instrumentos de los diámetros y de los eclipses del Sol y la Luna; con ejemplos de eclipses remarcables. En este libro encontrarás, lector, entre muchas otras cosas nuevas, un tratado riguroso sobre la visión y la función

FUENTE: *DISCOURS DE LA MÉTHODE... PLUS LA DIOPTRIQUE, LES MÉTÉORES ET LA GÉOMETRIE*, RENÉ DESCARTES (LEIDEN, 1637), PÁG. 61

de los humores oculares, contra los ópticos y los estudiosos de la anatomía».

Pese al uso de la palabra «complementos» (*paralipomena*) en el título, la obra de Kepler es una enmienda a la totalidad de la óptica como se entendía hasta entonces. Kepler da protagonismo a la luz y desecha el concepto de especie. Conceptualizada en términos filosóficos neoplatónicos como inmaterial, la luz será para él la protagonista de la visión. Como siempre en Kepler —y en los grandes científicos de la época—, filosofía y matemáticas van de la mano: la luz se mueve rectilíneamente pero actúa superficialmente (se expande orbicularmente), luego su «fuerza» o intensidad decrece con el cuadrado de la distancia. Tomando en consideración el carácter rectilíneo de los rayos de luz, explica las imágenes de la cámara oscura en términos de la estructura geométrica subyacente a estos rayos.

A continuación, ataca el problema de la refracción. No se conocía qué ley relacionaba el ángulo de incidencia con el de refracción, un problema muy relevante para las observaciones astronómicas. Kepler intentó deducir una fórmula a partir de consideraciones físicas inspiradas por su concepción (metafísica) de la luz. Este capítulo contiene unas páginas dedicadas a las secciones cónicas de enorme originalidad y belleza. Finalmente, mediante razonamientos ad hoc guiados por los pocos datos de que disponía, concluye que $i - r$ (la diferencia entre los ángulos de incidencia y refracción) es proporcional a i y al inverso del coseno de r. Como demostró G. Buchdahl con las observaciones de la época, esta fórmula proporciona una buena aproximación a la ley de los senos. Sin embargo, al no poder derivarla a partir de causas físicas, Kepler nunca consideró que esta fuera la «verdadera» ley de la refracción. En *Dioptrice* (1611), el pequeño tratado dedicado al telescopio de Galileo, Kepler ignoró las causas físicas y asumió como axioma para ángulos de incidencia menores de 30º que los ángulos son proporcionales, y en particular para el cristal de las lentes, $r = (2/3)i$.

Kepler culmina los paralipómenos con un refinado análisis de la óptica del ojo humano. La anatomía ocular era conocida desde la baja Edad Media, pero en el siglo XVI todavía se debatía si el cristalino ocupaba una posición central o próxima a la pupila. Los conocimientos anatómicos presentados por Kepler, incluida una tabla del ojo y sus partes, están muy actualizados.

La figura que aquí se muestra ilustra la teoría de la visión de Kepler. Sugiere su elemento central: los objetos visibles V, X e Y quedan «pintados» de forma simétrica sobre la retina, en los puntos R, S y T, respectivamente. Indica también que esto es así por la refracción en el cristalino (L) de los haces de rayos que llegan a través de la pupila (FF). Asimismo, ilustra un experimento muy popular en el siglo XVII: los músculos y membranas de la parte posterior del ojo han sido extirpados para revelar la retina. Así se preparaban los ojos de buey (preferidos por su tamaño) para ser colocados en una obertura (ZZ) en la pared de una habitación a oscuras. La delicada y cuasi transparente retina permitía observar las imágenes formadas sobre ella. El experimento confirma la teoría de Kepler, pero solo se concibió y se realizó después de la publicación de la teoría kepleriana y de que esta fuera asumida por autores relevantes, como el astrónomo jesuita C. Scheiner (*Oculus*, 1619).

¿Qué convenció a Kepler (y después a sus lectores) de la existencia de las imágenes retinales? Kepler quería rebatir dos teorías: la del médico F. Platter y la del pensador Giambattista della Porta. Para Platter, la retina era el órgano de la visión, pero solo en el sentido de un ojo dentro del ojo que contemplaba el mundo ampliado por el cristalino, que operaba a modo de lupa. Sus conocimientos en óptica geométrica llevaron a Kepler a rechazar que el cristalino tuviera estas propiedades ópticas. Lo mismo que los ópticos medievales, Della Porta consideraba el cristalino como órgano de la visión, pero afirmaba que las especies visuales se proyectaban invertidas sobre el cristalino a través de la pupila (como si esta fuera el pequeño orificio de una cámara oscura).

Ambas propuestas eran especulativas, carecían de pruebas que las sostuvieran. Frente a ellas, Kepler defendió su teoría estudiando geométricamente la influencia del cristalino sobre la radiación que entraba por la pupila, y sobre la visión. Para simular el cristalino, utilizó un vaso de vidrio esférico lleno de agua, que colocó delante y muy próximo al pequeño orificio de una cámara oscura. Entonces, afirma Kepler, se puede observar que en el papel, donde antes se contemplaban borrosas las cosas en el exterior, ahora se dibujan las mismas cosas «de la forma más clara y hermosa», como en una pintura. Subraya que esta «pintura» se forma solo con el papel a una distancia aproximadamente igual al radio del vaso; a una distancia mayor o menor, muestra solo una mancha borrosa. Para el ojo situado frente al vaso, los efectos son opuestos. Allí donde la «pintura» es más nítida, el ojo ve solo extrema confusión; cuando el ojo se sitúa más cerca (más lejos), percibe una imagen aumentada y derecha (reducida e invertida), y parece que descansa en el vaso.

Kepler dotó de un estatus especial esas imágenes nítidas que se forman sobre una superficie, a una distancia predeterminada que depende de la geometría de la refracción. Para él eran algo más que imágenes. Solían tener un contenido cognitivo negativo: mostraban las cosas donde no estaban y a menudo deformadas. A las imágenes tradicionales (las que se utilizaban en la óptica medieval) Kepler opondrá las «pinturas» que el cristalino proyecta sobre la retina. Las pinturas, con su estructura geométrica precisa, formada por los conos de los haces de luz, no confunden, representan fielmente la realidad.

Kepler, el neoplatónico, se detuvo en ese punto. Esa estructura matemática de puntos de luz proporcionaba inmediatamente al alma, a los espíritus presentes en la retina, sin necesidad de mediador, la información necesaria para aprehender visualmente el mundo. Lo que pasa más allá de la retina ya lo explicarán los médicos, escribió —se percibe en esta frase cierta dosis de ironía, pues Kepler no creía en el saber de los médicos. Descartes, el mecanicista, propuso algo muy diferente: que la imagen retinal muestra los puntos donde la presión mecánica del éter está actuando sobre el nervio óptico. Las interpretaciones de cómo asimila la retina la imagen que recibe han sido muchas. Rindamos homenaje a su descubrimiento.

PARA SABER MÁS

Keplerian illusions. Geometrical pictures versus optical images in Kepler's visual theory. A. Malet en *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 21, págs. 1-40, 1990.

Paralipòmens a Vitel.lió (Els orígens de l'òptica moderna). J. Kepler. Introducción, notas y edición de A. Malet; traducción de J. Montserrat, E. Celma, I. Fígols. EUMO-IEC, Barcelona, 2010.

The origins of the telescope. Dirigido por A. van Helden et al. Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Press, Ámsterdam, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los orígenes del telescopio. Sven Dupré en *IyC*, septiembre de 2009.

La investigación del Sol en la época de Galileo. Hosrt Bredekamp en *IyC*, diciembre de 2009.

por Jeantine Lunshof

Jeantine Lunshof, experta en bioética, es profesora adjunta en la Universidad de Groninga e investigadora visitante en la Escuela de Medicina de Harvard.



Riesgos de la edición genética

El uso de las herramientas de modificación genética en especies salvajes debe regularse si queremos evitar un daño irreversible a los ecosistemas

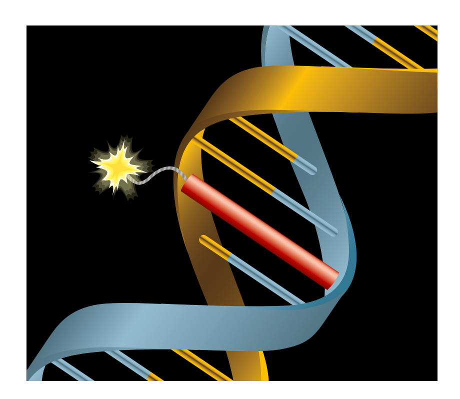
La edición del genoma se ha convertido en un asunto candente después del gran interés que ha despertado el uso de la técnica CRISPR [*véase* «La edición genética, más precisa», por Margaret Knox; Investigación y Ciencia, febrero de 2015] para modificar embriones humanos. Como testigo del desarrollo de este avance, me preocupa la forma en que podría llegar a utilizarse. Pero no en el sentido en que el lector estará pensando.

Las cuestiones éticas que plantea la ingeniería aplicada a la línea germinal humana sin duda merecen consideración. Sin embargo, no deben distraernos de un problema mucho más acuciante: el creciente uso de CRISPR para corregir los genomas de poblaciones de animales salvajes. A menos que se regule y se contenga en el laboratorio, esta práctica entraña el potencial de alterar rápidamente ecosistemas de una manera perjudicial e irreversible.

Ya se ha utilizado CRISPR para modificar mosquitos y la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. Y, en combinación con la técnica del «impulso génico» (*gene drive*), se ha visto que aumenta enormemente la eficacia para transferir modificaciones a la descendencia y a lo largo de la población. Una vez introducidos, los cambios genéticos se autopropagan; si se liberaran fuera del laboratorio, los efectos se extenderían con cada nueva generación y pronto estarían fuera de control.

Esta nueva modalidad de edición genera cambios rápidos en una población con reproducción sexual, ya que depende de genes que se transfieren de manera preferente. (En condiciones normales, los rasgos introducidos topan con la estadística de la herencia mendeliana y se asientan en una población mucho más lentamente.) La alteración de poblaciones de animales salvajes mediante el «impulso génico» tiene como objetivo interrumpir rápidamente un rasgo particular, como la capacidad de los mosquitos *Anopheles* para transmitir la malaria. Se realiza un primer cambio a pequeña escala en el ecosistema de interés (en este ejemplo, la interrupción preliminar se hallaría restringida al hábitat natural del mosquito). Pero el riesgo de que se produzca una disrupción más amplia en el ecosistema se desconoce; se requeriría una modelización matemática para estimarlo.

La técnica del impulso génico fue desarrollada en nuestro laboratorio. En la descripción inicial que se publicó en julio de 2014 en *eLife*, Kevin M. Esvelt y otros de mis colegas hicieron un llamamiento para emplear medidas de bioseguridad estrictas y contar con el consentimiento público. Mientras tanto, sus aplicaciones siguen adelante. En lo que se conoce como una «reacción en cadena mutagénica», Valentino M. Gantz y Ethan Bier, de la Universidad de California en San Diego, la han utilizado para alterar la *D. melanogaster*. Su trabajo ha provocado temores serios sobre la bioseguridad. Se llevó a cabo en un laboratorio, pero si estos insectos modificados escaparan, podrían extenderse y cruzarse con la población silvestre. Estos experimentos deben permitirse, pero solo bajo las condiciones de seguridad más estrictas.



En menos de tres años, CRISPR se ha convertido en una herramienta crucial para los biólogos —demasiado tarde para plantear si debería detenerse su uso—. Sus aplicaciones son tan variadas que no existe una única evaluación ética que pueda englobarlas a todas. Las diversas consecuencias de la modificación del genoma en células somáticas o en la línea germinal humana, y la modificación del ecosistema a través del impulso génico, requieren distintas evaluaciones éticas y políticas.

Algunos críticos sostienen que los efectos imprevisibles que la edición de la línea germinal humana podría causar en las generaciones futuras la convierten en una técnica peligrosa y éticamente inaceptable. La incertidumbre, sin embargo, no es un elemento útil para juzgar las cuestiones éticas. Otros destacan los potenciales propósitos no terapéuticos. Desde el punto de vista ético, no está tan claro que la modificación de rasgos genéticos sea, por definición, algo malo. Por otra parte, los criterios que diferencian lo que es «terapia» de lo que es «mejora» son flexibles.

Las consecuencias de modificar genomas humanos serán limitadas porque los efectos estarán siempre restringidos a los humanos, en concreto, a la persona afectada y a sus descendientes. Por tanto, los riesgos de bioseguridad no son evidentes en este momento.

Mucho más preocupante es la posibilidad de modificar el ecosistema. Tal disrupción entraña consecuencias más graves, más complejas y sistémicas; la extensión de su impacto y la duración de sus efectos son difíciles de predecir. En principio, la técnica del impulso génico es reversible, pero ello todavía no se ha comprobado. Los organismos modificados con capacidad de autopropagación no pueden restringirse dentro de las fronteras nacionales y presentan desafíos importantes en cuanto a su regulación. Necesitamos una revisión urgente de los protocolos de bioseguridad para estos experimentos.

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 521, mayo de 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

THINKSTOCK/SEAMARTINI (*cadena de ADN*)



Límites de la restauración

EN LA COMARCA DE LOS MONEGROS, en Huesca, se han restaurado humedales que habían sido degradados por la agricultura intensiva de regadío. Las lagunas de la fotografía se crearon en antiguas tierras agrícolas para reducir la contaminación de las aguas por fertilizantes y mejorar la biodiversidad.

de humedales



No podemos confiar en que la restauración restablezca los ecosistemas destruidos por los humanos. Sin embargo, ciertas medidas podrían mejorar su recuperación

David Moreno Mateos

David Moreno Mateos es investigador en el Centro Vasco para el Cambio Climático BC3, en Bilbao, un centro de investigación independiente promovido por el Gobierno vasco y la Universidad del País Vasco. Actualmente, estudia la recuperación de ecosistemas tras impactos humanos con vistas a conocer las mejores medidas para su restauración.



DESDE LOS MANGLARES TROPICALES HASTA LAS TURBERAS BOREALES, LOS HUMEdales se cuentan entre los ecosistemas más productivos y de mayor valor económico de todo el mundo. Proporcionan a la población humana beneficios y servicios esenciales. Extraen una parte del dióxido de carbono que emitimos a la atmósfera, contribuyen a la biodiversidad del planeta, depuran el agua contaminada que fluye por ellos y reducen el riesgo de inundaciones y erosión. Además, constituyen zonas de indudable interés para la recreación y el ecoturismo.

Sin embargo, debido a las actividades humanas, aproximadamente el 50 por ciento de los humedales del mundo han desaparecido solo en el pasado siglo. En países como España, Francia o China, la pérdida ha alcanzado alrededor del 60 por ciento, mientras que en otras zonas, como nueva Zelanda o California, ha llegado al 90 por ciento.

Tal destrucción acabó en España con más de 200.000 hectáreas de marismas en el entorno de lo que hoy es el Parque Nacional y Natural de Doñana, en Sevilla, una zona que en su momento constituyó uno de los humedales más extensos de Europa. Un destino similar sufrió la cercana laguna de la Janda, en Cádiz, que en el pasado cubría unas 5000 hectáreas; era la laguna de agua dulce más extensa de la península ibérica y la única del sur de Europa donde criaban las grullas comunes (*Grus grus*) y múltiples especies hoy gravemente amenazadas en España, como la focha cornuda (*Fulica cristata*). La degradación ha afectado, asimismo, a un sinfín de otras zonas húmedas, como el delta del Ebro, en Tarragona; la laguna de la Nava, en Palencia; o la Camarga, en la región francesa de Languedoc-Rosellón.

Por fortuna, debido a una menor presión de las actividades humanas sobre los ecosistemas y a la proliferación de normativas que favorecen la conservación de la naturaleza, la destrucción de humedales en los países desarrollados se ha frenado drásticamente, aunque aún siga ocurriendo a menor escala. Pero el problema fundamental estriba en la gran pérdida que se ha producido hasta el momento, una situación que exige la introducción de medidas para restaurar estos ambientes. La Unión Europea, la Convención para la Diversidad Biológica y muchas otras organizaciones internacionales y Gobiernos (incluido el de España) están desarrollando estrategias para abordar tal reto. Cada año se invierten enormes cantidades de dinero en la restauración de humedales, especialmente en Norteamérica, Europa y Australia. Solo en Estados Unidos se gastaron más de 70.000 millones de dólares en restaurar 30 millones de hectáreas de humedales en los últimos 20 años. La financiación europea, aunque muy por detrás de la estadounidense, aumenta también cada año.

Pero a pesar de la magnitud de las inversiones, los resultados obtenidos hasta hoy son pobres y la eficacia de las actuaciones, incierta. La restauración ecológica es una disciplina joven. Han pasado menos de 40 años desde que dejase de ser un campo de investigación marginal —a pesar de que los primeros ensayos de restauración empezaron en los años cuarenta del siglo xx—. Tal situación conlleva que los métodos se hallen aún en pleno desarrollo, que los procesos de recuperación solo estén empezando a ser comprendidos y que ni siquiera esté claro cómo medir si una restauración resulta exitosa o no.

El escaso éxito que suelen tener las actuaciones lo hemos comprobado en una evaluación a escala mundial sobre el estado de recuperación de distintos humedales restaurados con anterioridad. El estudio, publicado en 2012 en *PLoS Biology*, reveló que tales ecosistemas no han recuperado por completo su biodiversidad, estructura y funciones originales. De ahí que los humedales restaurados no puedan considerarse iguales que los primigenios, sino versiones más o menos simplificadas de estos, y muy probablemente tardarán décadas o incluso siglos en recobrarse. Para gestionar con mayor eficacia las zonas húmedas destruidas necesitamos conocer con mayor profundidad su funcionamiento y sus mecanismos de regeneración tras una perturbación.

EN SÍNTESIS

Marismas, lagunas, pantanos, manglares y otros tipos de humedales proporcionan numerosos beneficios ambientales, económicos y recreativos. Sin embargo, solo en el pasado siglo los humanos hemos causado la desaparición de la mitad de estos hábitats en el planeta.

La restauración ecológica pretende reparar esos daños, pero no consigue casi nunca restablecer el estado primigenio del ecosistema, por lo que no debería emplearse para compensar la destrucción de más humedales bien conservados.

Para mejorar la gestión de las zonas húmedas resulta necesario conocer con mayor profundidad su funcionamiento y sus mecanismos de recuperación tras una perturbación.

Doñana, una historia de degradación y restauración

El Parque Nacional y Natural de Doñana es uno de los lugares de invernada de aves más importantes de Europa y alberga el complejo de humedales temporales más extenso del continente. Pero, a pesar de su estatus de protección, esta zona húmeda sigue estando amenazada. Sobre todo, a causa de la eutrofización de sus aguas, provocada por la contaminación agrícola y urbana, y la fuerte alteración hidrológica que ha sufrido en los últimos siglos. Esta última comenzó en el siglo XVIII, cuando los humedales se convirtieron en tierras agrícolas, una práctica que se intensificó entre los años cincuenta y setenta del siglo XX. Como consecuencia del drenaje y del aislamiento de los humedales respecto de los cursos de agua principales y del estuario del Guadalquivir, se han alterado procesos como la dispersión de semillas y organismos acuáticos y se han producido grandes mermas en las poblaciones de peces, mamíferos, anfibios y aves.

En los años noventa, comenzaron los primeros intentos de recuperar la biodiversidad y los procesos ecológicos mediante la reconexión de algunos humedales con los antiguos arroyos que los alimentaban. Sin embargo, debido al desconocimiento de la complejidad natural de la red de humedales, los cursos de agua y sus dinámicas subterráneas, tales intentos no lograron restablecer la conectividad hidrológica del entorno y, por lo tanto, tampoco de las poblaciones de peces y aves.

En 1998 la zona se vio afectada por el desastre de Aznalcóllar. La ruptura de la balsa de lodos de pirita de la empresa sueca Boliden provocó el derrame en los cursos de agua de millones de metros cúbicos de lodos contaminados con metales pesados. Estos últimos se introdujeron en las cadenas tróficas de la marisma y causaron diferentes grados de envenenamiento a todo tipo de organismos, desde invertebrados acuáticos hasta aves. Con el propósito de reparar los daños, en el 2000 se inició uno de los mayores proyectos de restauración de humedales de Europa, denominado Doñana 2005. Este involucró múltiples acciones centradas en restaurar la hidrología de algunas de las cuencas de alimentación de los humedales (mediante la recuperación de la cubierta vegetal, el cierre de drenajes y la apertura de barreras hidrológicas) y en reducir la contaminación procedente de las áreas agrícolas y urbanas existentes en las cuencas del entorno de Doñana.

En la actualidad, todavía deben ejecutarse o completarse numerosas acciones de ese proyecto. A pesar de ello, varios estudios realizados por investigadores de la Estación Biológica de Doñana, del CSIC y de varias universidades españolas han comenzado a mostrar que en algunas zonas ya se ha iniciado la recuperación de ciertas comunidades de aves y macroinvertebrados acuáticos gracias a la restauración. Aún queda mucho trabajo para recuperar grandes partes del complejo de humedales de Doñana. Si bien no se puede pretender restablecer lo que una vez fue, sí se puede lograr un gran ecosistema mantenido por un desarrollo responsable y una estrategia clara de conservación.



La restauración de la laguna de la finca Caracoles fue una de las actuaciones del proyecto Doñana 2005. En un terreno antiguamente drenado y explotado para el cultivo (*inserto*) se crearon múltiples charcas elípticas para imitar los humedales temporales naturales de la zona (*fondo*). Los estudios demostraron una recuperación de la diversidad de las comunidades de invertebrados acuáticos (aunque no siempre la composición de sus especies); también se observó la influencia del tamaño y ubicación de las charcas en la regeneración de las poblaciones de aves.

HÉCTOR GARRIDO (*lagunas*); ESTACIÓN BIOLÓGICA DE DOÑANA (*cultivos*)

ESTABILIDAD DINÁMICA

Los humedales son hábitats que se hallan inundados de forma periódica o permanente con aguas salinas, salobres o dulces. Estas alcanzan escasa profundidad (menos de 6 metros) y forman corrientes lentas o se estancan. Entre los distintos tipos de zonas húmedas se incluyen las marismas de agua dulce o salada, las lagunas someras, las zonas inundables, las charcas temporales o permanentes, los pantanos, los manglares y las turberas.

Durante el desarrollo de un humedal, desde el momento de su aparición (por ejemplo, cuando una zona seca se inunda a causa de un cambio en la topografía), numerosas especies de todo tipo (microorganismos, plantas, algas, aves, mamíferos y anfibios) harán un uso temporal o permanente de este sistema. Las interacciones entre los organismos que lo colonizan y se establecen en él, así como entre estos organismos y el medio abiótico (el suelo, el agua y la atmósfera), permiten que el ecosistema funcione y se perpetúe de forma estable en el tiempo. Este estado puede tardar milenios en alcanzarse. Sin embargo, esa estabilidad no significa que el humedal resulte inmutable y vivan en él siempre las mismas especies. En lugar de ello, alcanza una estabilidad dinámica, lo que significa que, aun manteniendo su condición de humedal, incorpora nuevos organismos mientras que otros se extinguen; se produce así un cambio lento, pero constante, de las especies que lo componen y de las relaciones entre ellas.

Cuando se llega a esa estabilidad dinámica, decimos que el humedal es funcional, lo que significa que genera múltiples funciones como consecuencia de las interacciones biológicas comentadas. Algunas de esas funciones nos aportan a los humanos claros beneficios directos, a los que suele referirse como servicios ecosistémicos. La extracción de dióxido de carbono de la atmósfera constituye uno de ellos. Las plantas fijan el carbono para realizar la fotosíntesis y, más tarde, los restos vegetales que caen al suelo, que se halla inundado, se descomponen muy lentamente. Esta circunstancia mantiene el carbono almacenado en los suelos durante largos períodos de tiempo, lo que demora su regreso a la atmósfera. Asimismo, los humedales mitigan las inundaciones gracias a su capacidad de almacenar agua y de reducir la energía de los ríos cuando aumenta su caudal tras las tormentas. La producción de alimentos sostenida representa otra función importante. Una parte de la alimentación de numerosos países está asegurada gracias a la productividad natural de peces, moluscos, crustáceos o aves que ofrecen los humedales.

Otros muchos procesos no poseen un valor directo evidente para los humanos, pero son indispensables para el funcionamiento del humedal, como la descomposición de la materia orgánica (que interviene en el ciclado de carbono y otros nutrientes esenciales para plantas y animales). Y algunos de los servicios que no se valoran en la actualidad tal vez se consideren esenciales en un futuro, cuando nuestro conocimiento sobre el funcionamiento de los ecosistemas mejore. Por ejemplo, hasta no hace muchos años, no se daba importancia a la protección que proveían los manglares y las marismas costeras frente a las grandes tormentas, tsunamis y huracanes. Hoy en día, en cambio, tal servicio se valora como fundamental y está llevando a restaurar miles de hectáreas de este tipo de ecosistemas en todo el mundo.

Un humedal funcional que presenta una estabilidad dinámica suele mostrarse resistente y resiliente (capaz de recuperarse) ante los impactos que alteran su biodiversidad o sus funciones. Así sucede cuando se ve modificado por elementos naturales, como los huracanes, o algunos usos tradiciones de bajo impacto, como la pesca tradicional o la extracción moderada de agua para el riego o el consumo humano. Sin embargo, no tiene la capacidad de reaccionar ante perturbaciones drásticas. Estas consisten en el drenado de marismas para crear campos de cultivo, como ocurrió en Doñana, en la laguna de la Janda y en Rancho Humo, en Costa Rica; en la regulación de los ríos mediante la construcción de embalses, lo que reduce en gran medida el aporte de sedimentos necesario para mantener los humedales costeros, como el de la isla de Poplar, en la bahía de Chesapeake (Maryland, EE.UU.) o el del delta del Ebro; o en la proliferación de especies invasoras, como ocurre en la laguna de Medina, en Cádiz, donde la carpa (*Cyprinus carpio*) devoró todas las plantas acuáticas e impidió el desarrollo de poblaciones de macroinvertebrados y, como consecuencia, de aves acuáticas. En tales casos, el daño resulta mucho más grave, por lo que la recuperación del ecosistema conllevará más tiempo o exigirá una intervención humana profunda. Esta intervención puede ser la restauración.

¿HUMEDAL RESTAURADO, HUMEDAL RECUPERADO?

La restauración es el proceso de *ayudar* a la recuperación de los ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos, según la definición que propuso la Sociedad de Restauración Ecológica en 2004. Ello significa que, después de aplicar una serie de medidas, debe permitirse que sigan su propio camino sin que los humanos tengan que intervenir indefinidamente. Con el paso del tiempo, tal vez siglos o incluso milenios después de las actuaciones, los ecosistemas restaurados, incluidos los humedales, se estabilizarán por sus propios medios. La medida de restauración más frecuente consiste en restablecer las condiciones hídricas que presentaba el humedal antes de la perturbación.

Pero ¿cuándo se considera que se ha alcanzado tal estabilidad y puede darse por «finalizada» la restauración? Tal pregunta resulta hoy extremadamente difícil de contestar con datos empíricos. No hay ningún ecosistema que se hubiera restaurado hace 500 años y haya sido estudiado desde entonces. Hace poco, Michael Curran, del Instituto Federal de Tecnología de Zúrich, y sus colaboradores estimaron, mediante modelos informáticos, que un ecosistema terrestre degradado podría tardar más de 1000 años en recuperar características similares a las que poseía antes de ser alterado. Pero tal dato aún debe ser demostrado sobre el terreno.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, una vez que los humedales han sido destruidos, no todos siguen la misma trayectoria de recuperación tras las actuaciones de restauración. Así, los de zonas templadas o cálidas podrían tardar menos en restablecerse que los que se sitúan en zonas más frías. El calor podría acelerar el proceso de recuperación. Igualmente, la alta conectividad hidrológica entre las distintas marismas costeras hace que estas se recuperen mejor que los humedales endorreicos, por lo general más aislados y alejados unos de otros. Tal efecto podría guardar relación con la mayor cercanía y disponibilidad de los propágulos vegetales (partes de una planta que le permiten reproducirse) y de los animales que colonizarán los humedales restaurados. Cada humedal es único, como también lo es su trayectoria de recuperación; de ahí que, cuando esta se inicia, se ignora cómo será y cuándo se estabilizará.

En este punto, cabe destacar que un humedal restaurado en el que se observan numerosas plantas y pájaros no es sinónimo de un humedal recuperado; es simplemente otro tipo de hu-

Los resultados imprevisibles de la restauración

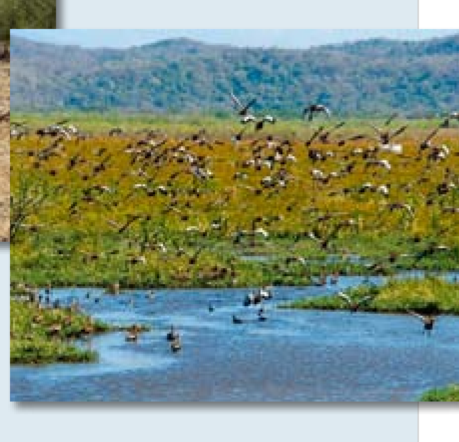
Evaluar la eficacia de la restauración conlleva una enorme incertidumbre, porque la recuperación de los humedales no es predecible. Ello se debe a la diferente trayectoria que pueden seguir los elementos básicos del ecosistema, como las especies que lo componen y las interacciones que se establecen entre ellas, o los nutrientes que se acumulan y se reciclan en el suelo. La distinta velocidad con que se recuperan estos elementos u otras circunstancias externas difíciles o imposibles de controlar, como la crecida de un río, determinarán el éxito o fracaso de las actuaciones. Los siguientes ejemplos lo ilustran.



Destrucción y construcción de la isla de Poplar
La isla situada, en la bahía de Chesapeake (Maryland, EE.UU.) desapareció como consecuencia de la pérdida del aporte de sedimentos a la bahía debida a la regulación de los ríos, entre otros factores (*izquierda*). A finales de los años noventa, se inició su restauración. Se incorporaron sedimentos procedentes del dragado de canales del puerto de Baltimore y, en el 2004, tuvo lugar una revegetación con *Spartina alterniflora* (*derecha*). Una evaluación superficial de las actuaciones puede sugerir una recuperación de la zona. Sin embargo, procesos esenciales para el correcto funcionamiento del humedal, como el ciclado de carbono o nitrógeno, no suelen recuperarse hasta décadas o siglos después de la restauración.

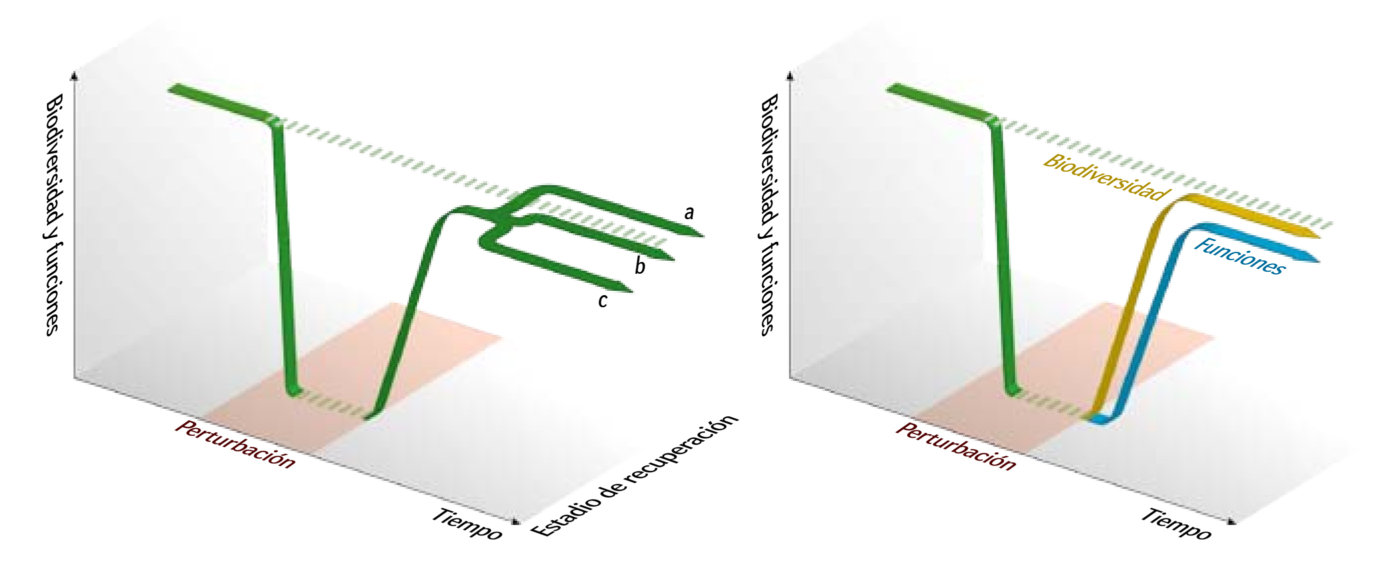
Rancho Humo: Resultados inmediatos
Las intervenciones pueden proporcionar algunos beneficios iniciales rápidos, como el fomento del ecoturismo. Este es el caso de Rancho Humo, una reserva privada en Costa Rica. Las actuaciones se realizaron en una antigua zona agrícola degradada (*izquierda*), de unas 1000 hectáreas, creada a partir del drenaje de un humedal. La restauración generó un entorno de gran importancia para las poblaciones de aves de Centroamérica (*derecha*). Hoy el nuevo humedal mantiene una empresa dedicada al turismo ornitológico. No obstante, algunos fenómenos impredecibles pueden redirigir los procesos de recuperación o incluso revertirlos (por ejemplo, una contaminación agrícola no controlada o la invasión de especies exóticas).







Un pez invasor en la laguna de Medina
En esta laguna de Cádiz se erradicó la carpa (*Cyprinus carpio*), una especie introducida que devoraba todas las plantas acuáticas e impedía el desarrollo de poblaciones de macroinvertebrados y aves acuáticas (*izquierda*). Tras su eliminación, la laguna mostró una rápida respuesta positiva y, cuatro años después, se habían desarrollado plantas acuáticas de las que se alimentaban las aves (*derecha*). Pero en ese momento una crecida del río reconectó la laguna con su cauce y volvió a introducir las carpas. El estado de la laguna hoy en día es el mismo que antes de la restauración.



MÚLTIPLES TRAYECTORIAS DE RECUPERACIÓN: **La biodiversidad y las funciones (como el ciclado de carbono y nitrógeno) de un humedal sin degradar (*línea verde*) son drásticamente reducidas cuando se produce una perturbación de origen humano (por ejemplo, el drenado para crear un campo de cultivo). Cuando se inicia la recuperación del ecosistema, bien de modo activo con medidas de restauración, o bien cuando la actividad degradadora cesa por completo, la evolución de este puede seguir diferentes trayectorias (*a, b, c; izquierda*). Estas pueden ser consecuencia de las distintas combinaciones de plantas empleadas para la restauración o de las especies concretas que colonizan de modo espontáneo el humedal. Algunos estudios indican, además, que la biodiversidad podría recuperarse antes que la funcionalidad (*derecha*). A pesar de los múltiples caminos que puede seguir la recuperación, el humedal no suele retornar a un estado similar al que presentaba antes de ser degradado hasta muchas décadas o siglos después.**

medal, que normalmente tendrá un menor número de especies (algunas de las cuales no siempre resultan fáciles de identificar, como los microorganismos), y en el que estas interaccionarán menos entre sí.

A esa conclusión llegamos en el estudio publicado en *PLoS Biology* señalado al principio del artículo. En él evaluamos el estado de recuperación de más de 600 ecosistemas restaurados distribuidos por todo el mundo; en concreto, analizamos la biodiversidad (el número de especies y la abundancia de individuos de esas especies) y algunas funciones biogeoquímicas (la cantidad de carbono, nitrógeno y fósforo almacenada en el suelo). Los datos se compararon con los de humedales no degradados de características similares —en realidad, dada la presencia humana global, es prácticamente imposible hallar humedales donde no haya habido ningún tipo de alteración—. Los resultados pusieron de manifiesto que, entre 50 y 100 años después de la restauración, los humedales solo habían recuperado el 75 por ciento de la biodiversidad y las funciones que poseían los ecosistemas inalterados. Las zonas restauradas no recobran su estado original, sino otro que se asemeja a este, pero más simplificado. La recuperación total tal vez solo se alcance después de muchas décadas, o incluso siglos.

RESTAURAR PARA MITIGAR LA DESTRUCCIÓN

A menudo se «restauran» humedales con un fin específico, esto es, para obtener un beneficio directo de ellos. Tal enfoque está ganando cada vez más popularidad y se emplea muchas veces para justificar el desarrollo de una «infraestructura verde» o las políticas de mitigación. Sin embargo, en estos casos el humedal no se restaura para que siga su trayectoria de recuperación espontánea, sino que se diseña para que cumpla una función que nos beneficie a los humanos. El lado positivo de esta práctica, aparte de obtener ese beneficio, es que, además, se crearán otras funciones de las que también podremos sacar provecho nosotros y otros organismos. El negativo es que se promueve que los ecosistemas restaurados se asemejen menos a los originales (antes de ser degradados), con lo que se contribuye a una pérdida global de funcionalidad y biodiversidad.

Estos «nuevos» humedales diseñados para cosechar servicios pueden almacenar mucho carbono o controlar muy bien las inundaciones, pero su capacidad de recuperación frente a ulteriores impactos naturales puede resultar inferior. Además, la incertidumbre de cómo funcionarán estos sistemas en el futuro, y de si nos proveerán de servicios aún no descubiertos, constituye un enorme riesgo que debemos estudiar en detalle antes de tomar la decisión de restaurar la zona a nuestra conveniencia.

Uno de los usos más frecuentes que se da a los humedales restaurados es el de descontaminar de nitrógeno las aguas residuales agrícolas. Especialmente los que se hallan en sus primeras fases de desarrollo tienen una alta capacidad para retener nitratos y fosfatos del agua, por lo que contribuyen a mejorar la calidad hídrica de las cuencas agrarias. Debido a que el diseño de este tipo de humedales suele optimizarse para reducir nutrientes, los flujos de agua, la profundidad que alcanza esta y las especies de plantas que los colonizan no son los que cabría hallar en un humedal espontáneo, incluso aunque la zona restaurada correspondiese a una antigua zona húmeda.

Otro ejemplo de restauración de humedales para el provecho humano lo ilustra el Plan Exhaustivo de Restauración de los Everglades, en Florida. Se trata de un conjunto de proyectos que se desarrollan en diferentes partes del territorio y abordan distintos aspectos, algunos más sociales y otros más hidrológicos. La realidad es que los Everglades, según se deduce de los resultados de este programa, nunca serán restaurados, sino transformados en ecosistemas altamente intervenidos por los

humanos y que aportarán numerosos servicios local o socialmente valorados. Pero no se promueve una autoorganización ecologica y geomorfológica del sistema para que se perpetúe por sí solo; siempre existirá la necesidad de mantenerlo en su conjunto, lo cual conllevará costes económicos.

Uno de los riesgos que entraña la mala comprensión de la restauración es su aplicación en las políticas de mitigación. Cada vez más países, entre ellos España y los de la Unión Europea en su conjunto, están desarrollando políticas en las que se permite destruir un ecosistema siempre que se restaure otro de características similares. Según se ha expuesto en este artículo, cuando se intenta sustituir un ecosistema degradado por otro «equivalente», una parte de sus especies, funciones y servicios solo se restablecen a muy largo plazo, o quizá no lo hagan nunca. Por lo tanto, la restauración, aunque resulta esencial para proteger la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, no debe ser utilizada para justificar la degradación de más humedales en buen estado de conservación.

La mayoría de las iniciativas de mitigación toman el ejemplo de las políticas de Estados Unidos, que tienen como objetivo evitar que se produzca una pérdida neta de superficies de humedales. Sin embargo, cabe destacar que en ese país, incluso con la Ley de Aguas Limpias, en vigor desde 1974, cada año se destruyen unas 5000 hectáreas de humedales «no degradados». Y en esta cifra no se incluyen los ecosistemas destruidos y restaurados, que, como hemos visto, solo resarcen una parte del daño. Con las políticas de mitigación no es posible alcanzar una pérdida neta de humedales igual a cero, por lo que nunca debería emplearse la restauración como una medida de compensación.

OPTIMIZAR LA RESTAURACIÓN

¿Cómo hay que proceder entonces con los humedales restaurados, menos biodiversos y funcionales que los naturales? En principio, parece que no cabe hacer mucho más que dejar que transcurra el tiempo necesario para que alcancen un estado «estable», con una alta diversidad biológica y funcionalidad. Pero debido a que tal proceso quizá lleve siglos, podrían aplicarse algunas estrategias que mejorasen la recuperación.

La ciencia de la restauración está empezando a entender los mecanismos que regulan el ensamblaje de comunidades, en especial de las vegetales, lo que posiblemente hará que en el futuro próximo la selección de especies se realice más acorde con las condiciones hidrológicas y edáficas, así como con las propiedades del agua de los ecosistemas que se están restaurando. La recuperación de la estructura y funciones de los humedales podría lograrse de este modo con mayor rapidez.

Los estudios más recientes, como los experimentos realizados en praderas por el equipo de Olivier Honnay, de la Universidad de Lovaina, sugieren que tal objetivo podría conseguirse, por ejemplo, mediante la introducción de especies que presenten una alta eficacia en la utilización de los recursos disponibles en el medio degradado, como el agua o los nutrientes del suelo. De esta forma, podría maximizarse la funcionalidad natural del humedal, con una mejora de la productividad, de la tasa de descomposición de los restos orgánicos y de otras funciones relacionadas con la regulación del ecosistema, muchas de las cuales pueden incluso desconocerse hoy en día.

También es importante identificar lo que no se está haciendo bien ahora mismo, esto es, las medidas de restauración que resultan inapropiadas o inútiles. En otra evaluación reciente de proyectos de restauración de humedales en todo el mundo, que he realizado en colaboración con James Aronson, del Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia, y Paula Meli, de Natura Mexicana, hemos comprobado que los ecosistemas repoblados con plantones no se recuperan mejor que los que no lo han sido, por lo que el uso de esta estrategia, una de las más ampliamente utilizadas en todo el mundo, debe restringirse a aquellas situaciones en las que se demuestre su necesidad y utilidad. Tal es el caso de algunos manglares, donde la fuerza de las olas evita que las semillas se establezcan por sí solas una vez que los árboles han sido eliminados. O de ciertas turberas boreales, donde, si no se añaden esporas del musgo del genero *Sphagnum*, la recuperación tardaría seguramente milenios.

Entender el proceso de recuperación resulta esencial para optimizar la restauración. Como ya hemos comentado, uno de los aspectos más importantes que determinan la funcionalidad de los ecosistemas es la interacción entre organismos. Ello ha llevado a nuestro grupo a estudiar el modo en que se construye la red de interacciones de un tipo de ecosistema, el hayedo, durante el período de recuperación y a identificar los elementos clave de esas redes. Pensamos que tal información nos ayudará a conocer la mejor forma de asegurar la recuperación.

Una gran pregunta que emerge de los resultados de los estudios centrados en la restauración de humedales es si la falta de recuperación que observamos en ellos ocurre también en otros ecosistemas. Para ello, varios equipos de investigadores de distintos países estamos realizando otra nueva evaluación global de la recuperación en la que esta vez incluimos bosques, lagos, ríos, praderas y ecosistemas marinos, además de los humedales. La respuesta vendrá pronto, y con ella esperamos contribuir al avance de la ecología de la restauración, que, como ciencia joven, necesita aún recursos y tiempo para crecer. Cabe imaginar la situación actual de esta disciplina como la de la medicina occidental hace 250 años, cuando empezó a desarrollarse. Afortunadamente, la restauración ecológica constituye un campo en auge, y el interés que muestran por ella la sociedad y los Gobiernos aumenta sin cesar. Hoy en día, la restauración no ofrece la solución perfecta para contrarrestar la degradación de ningún ecosistema, y mucho menos debe ser utilizada para justificar esta última, pero representa una gran herramienta para reducir la pérdida de biodiversidad y restituir los beneficios que obtenemos de los ecosistemas y que necesitamos para vivir en este planeta.

PARA SABER MÁS

Principios de SER International sobre la restauración ecológica. Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica. Grupo de trabajo sobre ciencia y políticas, 2004.

Doñana: Agua y biosfera. F. García-Novo y C. Marín Cabrera. Proyecto Doñana. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2006.

Structural and functional loss in restored wetland ecosystems. D. Moreno-Mateos, M. E. Power, F. A. Comín y R. Yockteng en *PLoS Biology*, vol. 10, n.º 1, e1001247, 2012.

Is there any empirical support for biodiversity offset policy? M. Curran, S. Hellweg y J. Beck en *Ecological Applications*, vol. 24, n.º 4, págs. 617-632, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Humedales. Jon A. Kusler, William J. Mitsch y Joseph S. Larson en *IyC*, marzo de 1994.

Recuperar las zonas húmedas. John Carey en *IyC*, agosto de 2015.

Rec



BAHÍA DE DELAWARE. Después de que los ingenieros mejoraran los arroyos de agua dulce que desembocaban en la degradada marisma para que los peces pudieran prosperar, la naturaleza regeneró la vegetación moribunda convirtiéndola en una masa vegetal tupida y lozana.

uperar las zonas húmedas

Numerosos proyectos de restauración de humedales han fracasado en el intento de recrear los ecosistemas primigenios. Pero varias iniciativas recientes han cosechado éxitos al fijarse solo uno o dos objetivos y dejar que la naturaleza siguiera su curso

John Carey



EN SÍNTESIS

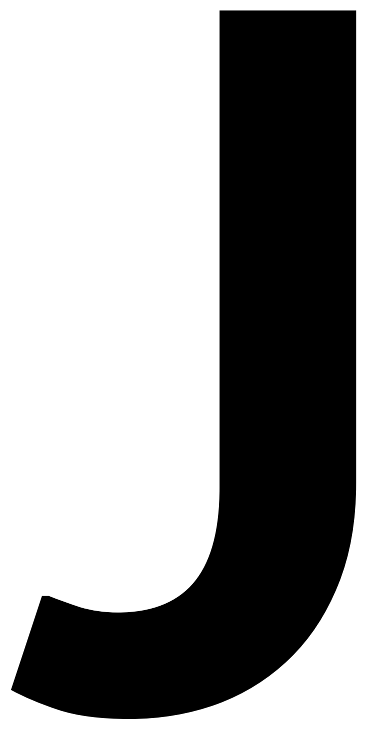
Los humedales siguen desapareciendo a un ritmo alarmante en Estados Unidos y en otras regiones del mundo. Los proyectos para la recuperación de estas zonas han fracasado estrepitosamente y dilapidado millones de dólares porque han pretendido reconstruir todos los aspectos del ecosistema original.

En vez de ello, deben perseguirse uno o dos objetivos, como potenciar las poblaciones piscícolas o mejorar la calidad del agua, y dejar que los restantes elementos del ecosistema sigan su curso.

Diversas restauraciones basadas en ese principio están logrando buenos resultados en la bahía de Delaware, el litoral de Luisiana y otras regiones del globo.



John Carey, antiguo corresponsal de *BusinessWeek*, es redactor especializado en energía y ambiente.



oy Zedler planificó con detenimiento los tres humedales experimentales que iba a crear en el arboreto de la Universidad de Wisconsin-Madison para que resultaran idénticos. Ordenó excavar tres parcelas paralelas de 90 metros de largo por 4,5 metros de ancho y luego plantar en ellas especies vegetales similares. Pretendía observar cómo la vegetación absorbía y depuraba el agua de escorrentía procedente de las tormentas.

El equipo de Zedler reguló el caudal de agua que afluía a las parcelas desde un estanque situado en un extremo para que también fuera idéntico en cada una de ellas. Querían medir las cantidades de nutrientes disueltos en el agua que entraban en cada humedal y acababan en otro estanque situado en el extremo opuesto, así como la estabilidad del suelo, el agua absorbida y la productividad y diversidad de las hierbas y demás plantas. Esperaban que los tres modelos de humedal mostraran un comportamiento semejante.

El desafío era importante, tratándose de un proyecto universitario. La ciudad de Madison estaba interesada en él porque quería emplear los humedales para ralentizar y depurar las aguas pluviales que desde la población desaguan en el cercano lago Wingra, afectado por el alto contenido en nutrientes (como nitrógeno y fósforo) del agua de escorrentía. Y saber maximizar los numerosos servicios ecosistémicos que prestan los humedales, desde la mitigación de los daños causados por la escorrentía y las inundaciones hasta la mejora de la biodiversidad, adquiere cada año que pasa mayor urgencia ante el alarmante ritmo de desaparición de estos ecosistemas en todo el mundo. Zedler, catedrática de botánica y ecología de la restauración, esperaba que el experimento aportara alguna pista.

Tres años después, resultó patente que el experimento suscitaba preguntas inesperadas. «Ninguna parte del sistema se había comportado como suponíamos», explica Zedler. La primera sorpresa fue que, pese a que las parcelas se hallaban separadas por un escaso metro de distancia y se habían introducido las mismas plantas para que desarrollaran la misma vegetación, una parcela quedó dominada por las aneas, mientras que en las otras dos prosperaron hasta 29 especies vegetales. En segundo lugar, aunque la parcela de las aneas produjo más biomasa vegetal, distaba mucho de mostrar el crecimiento lujuriante que se esperaba. Tampoco frenó el agua de las crecidas ni controló la erosión del suelo y absorbió pocos de los nutrientes disueltos. En las parcelas vecinas se lograron más resultados positivos, según lo esperado, aunque no una mayor productividad.

¿Qué explica esas singulares diferencias? El equipo de Zedler descubrió que una capa de arcilla situada debajo del aneal era un poco más gruesa —y por tanto menos permeable— que en las parcelas aledañas, de modo que el agua permanecía estancada y no se infiltraba en el suelo. Como consecuencia, el agua de las tormentas y los nutrientes no eran retenidos y se perdían por el canal. Paralelamente, las aneas desplazaron al musgo, el cual estabiliza el suelo, por lo que la erosión fue más acentuada que en las parcelas vecinas, donde este creció bien.

Esos hallazgos insólitos están ayudando a otros expertos a averiguar por qué la restauración de humedales ha cosechado hasta ahora tan magros resultados y señalan el modo de mejorarlos. La gran lección derivada de estas investigaciones es que debemos abandonar todo intento por recrear fielmente un humedal idéntico al ecosistema perdido. «No sabemos cómo hacerlo», sentencia Doug Wilcox, catedrático de ciencias de los humedales en el colegio Brockport de la Universidad estatal de Nueva York. Hay demasiadas variables en juego.

En lugar de esa estrategia, conviene más trazar uno o dos objetivos principales, como reconstruir el terreno, mejorar la calidad del agua o potenciar las poblaciones de peces, y diseñar el sistema en consonancia con esas metas. Después, una vez hecho el trabajo básico de ingeniería, hay que dejar que la naturaleza se ocupe de los pormenores a su albedrío.

Otra lección aprendida es que los proyectos de restauración de humedales deben ser supervisados durante años, tal y como Zedler sigue haciendo con su experimento. Se requiere ese tiempo para descubrir los detalles de lo que funciona y por qué, y adoptar medidas correctoras en caso necesario. A diferencia de los automóviles, «los humedales no vienen con manuales de reparación», asegura Wilcox.

Aceptar la idea de que no podemos restituirlos a su estado primitivo nos hace conscientes de las limitaciones de la ciencia. Pero lograr uno o dos objetivos puede suponer un gran paso adelante. La inspiración la aporta una lista creciente de proyectos que han culminado con éxito: desde la bahía de Delaware

páginas anteriores: diana kehoe, getty images



UNA PAREJA DE GRULLAS CANADIENSES sale del estanque recolector de agua pluvial en un humedal experimental diseñado en la Universidad de Wisconsin-Madison; la escorrentía urbana provocó una inesperada invasión de aneas (*verde oscuro*).

CORTESÍA DE JOY ZEDLER, UNIVERSIDAD DE WISCONSIN-MADISON

y el delta del Misisipi hasta las costas de Irak y Guyana. «La restauración se halla ahora mucho más avanzada que antes», asegura William J. Mitsch, director del Parque de Investigación Everglades en Florida.

LOS RIÑONES DE LA NATURALEZA

Los éxitos recientes son bienvenidos porque los humedales poseen un enorme valor. Mitsch los califica como «los riñones de la naturaleza» y «supermercados ecológicos, donde todos los animales acuden a comer o a ser comidos». Michael Weinstein, del Instituto de Tecnología de Nueva Jersey, luce una pegatina en su coche en la que se puede leer: «Sin humedales no hay marisco», y ha demostrado que la cadena trófica que nace en las marismas extiende sus tentáculos vitales hasta mar adentro. «Representan sin duda ecosistemas muy provechosos para los humanos», asegura.

Las zonas húmedas también nos protegen. Catástrofes como el huracán Sandy ha hecho comprender a muchas personas que «acabar con las marismas y las dunas ha sido una estupidez», sentencia John M. Teal, experto en marismas y miembro emérito del Instituto de Oceanografía Woods Hole. Los vestigios de lo que antaño fueron las marismas de la Bahía de Jamaica en Long Island ayudaron a disipar la furia del temporal, mientras que los alrededores de Manhattan, privados de cualquier rastro de humedal, recibieron de pleno el embate del mar embravecido. Los humedales también absorben los nutrientes que las aguas arrancan de las tierras agrícolas y que a través de los ríos alimentan las proliferaciones de algas tóxicas y las mortíferas zonas anóxicas en las aguas costeras. Amansan las crecidas. Y por si todo ello no bastara, en palabras de Mitsch, probablemente constituyen el mejor ecosistema del planeta para secuestrar el carbono, con el que se forma una vegetación densa y un suelo rico en materia orgánica.

Pero los humedales están desapareciendo a marchas forzadas. Han sido desecados para sembrar maíz en Iowa y espartillo forrajero (*Spartina patens*) en Delaware; anegados para crear estanques para la cría de peces y gambas en Tailandia; terraplenados para construir aeropuertos y ciudades en todo el mundo, y despojados de los sedimentos fluviales al levantarse diques y embalses por doquier. Mitsch calcula que las zonas húmedas ocupaban en el pasado entre el 4 y el 6 por ciento de las tierras emergidas del planeta, la mitad de las cuales han desaparecido.

Para detener esa marea se están llevando a cabo esfuerzos coordinados. Jessica Bennett Wilkinson, asesora de políticas de mitigación en The Nature Conservancy, calcula que cada año EE.UU. destina 3900 millones de dólares a los humedales por el artículo 404 de la Ley de Aguas Limpias (*Clean Water Act*). La ley exige que los promotores inmobiliarios o todo aquel que destruya zonas húmedas las restauren o creen otras a modo de compensación.

Y aún se destina más dinero en todo el mundo en proyectos como la replantación de mangles. Por desgracia, los datos apuntan a que el dinero no se está invirtiendo con acierto. Según los cálculos de Robin Lewis, presidente de la asesoría Lewis Environmental Services, el 90 por ciento de lo invertido en la restauración de manglares se derrocha. «Estamos hablando de millones y millones de dólares desperdiciados cada año en proyectos, y sufrimos fracasos muy similares con todos los tipos de humedales», asegura. Un reciente análisis de 621 humedales restaurados, dirigido por el ecólogo David Moreno Mateos, por entonces en la Universidad Stanford, demuestra que las restauraciones distan mucho de recomponer por completo las funciones que cumplen los humedales naturales, incluso 50 o 100 años después [*véase* «Límites de la restauración de humedales», por David Moreno Mateos, en este mismo número].

Una de las razones de tal fracaso es la discrepancia que existe entre la biología y la ingeniería. «Mientras el responsable del departamento de biología se concentra en un aspecto, el de ingeniería lo hace en otro, y ambos aciertan y se equivocan en parte», explica Mitsch. Una crítica relativa a la labor del

Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., el organismo que supervisa la gran mayoría de las restauraciones financiadas por el Gobierno estadounidense, sostiene que la ingeniería descuida con frecuencia las realidades biológicas.

Los esfuerzos fracasan principalmente por la carencia de conocimientos profundos del tipo que Zedler, Wilcox y otros investigadores están adquiriendo a base de un trabajo concienzudo. «Me enoja pensar que los ciudadanos han estado sufragando la restauración de humedales sin contar con los métodos idóneos», confiesa Wilcox.

RECONDUCIR LAS AGUAS A SU CAUCE

A la vista de las circunstancias, ¿qué es preciso mejorar? Todos los proyectos deben marcarse como punto de partida uno o dos beneficios y escoger una técnica básica para alcanzarlos. Uno de los retos clave que puede parecer obvio pero que a menudo no se aborda con suficiente rigor es el de conseguir unas condiciones hídricas adecuadas. En palabras de Lewis: «No hay que saber latín, es una cuestión de pura hidrología».

En contados casos, el simple restablecimiento del aporte de agua obra milagros. A causa de los conflictos armados, los embalses y el empeño de Saddam Hussein en privar a sus oponentes de sustento, el 90 por ciento de los 20.000 kilómetros cuadrados de marismas del sur de Irak quedó destruido en el año 2000. Tras el derrocamiento de Hussein en 2003, un proyecto pionero, Eden Again, recondujo el agua de los ríos Tigris y Éufrates a la zona. La marisma floreció de vida. Miles de antiguos lugareños regresaron para dedicarse a la cría de búfalos acuáticos, la pesca y la fabricación de esteras con aneas. Pero la pervivencia de la marisma resulta precaria: la construcción de una presa en el tramo turco del Tigris amenaza con provocar de nuevo escasez de agua.

Lograr las condiciones hídricas adecuadas resulta crucial para restaurar los manglares, que ahora desaparecen a un ritmo superior a las 100.000 hectáreas anuales en todo el mundo, según Lewis. El objetivo mínimo estriba en ayudar a que los árboles crezcan para que puedan amortiguar las marejadas destructivas y las pleamares altas. Cualquier otro beneficio que podamos obtener constituye un plus.

Según el planteamiento tradicional habitual, el equipo de un proyecto construye un vivero, cultiva miles de plantones y los planta en los fangales costeros. «Tales proyectos se califican como exitosos, pero en tres o cinco años todos los árboles han desaparecido», asegura Lewis.

El culpable suele ser el exceso de agua. Y es que, en realidad, los manglares permanecen la mayor parte del tiempo en seco, «algo que hemos tardado décadas en comprender». Cuando el experto en restauración Jamie Machin llegó a Guyana en julio de 2012 en calidad de director de equipo de la asesoría para el desarrollo Landell Mills, midió el nivel de la marea en lugares donde habían fracasado algunos proyectos. Los fondos litorales eran, en promedio, 50 centímetros demasiado profundos; las raíces y la base de los árboles pasaban demasiado tiempo sumergidas en el agua salada en una lenta agonía.

Machin trabajó con un equipo del Gobierno estadounidense para erigir espigones y plantar la hierba *Spartina*. Tales medidas ayudan a retener los sedimentos y elevar los fondos de fango, con lo que se reduce el tiempo en que los árboles permanecen anegados. Esta medida también permitió prescindir de la costosa repoblación con plantones; como en la cercanía crecían árboles, estos produjeron propágulos (diminutos árboles envueltos en una vaina) que cayeron al agua y colonizaron las nuevas orillas impulsados por las olas y las corrientes. «Una vez acumulado el volumen necesario de sedimentos, el sistema produce propágulos en número suficiente para regenerar el manglar», asegura Machin. No es necesario diseñar un ecosistema entero.





LA MARISMA DE TORN SALT MARSH, en la bahía de Delaware (*arriba*, 1998), se restauró abriendo un pequeño número de vías en los diques adyacentes para que el agua dulce afluyera y excavara canales mareales naturales, lo que permitió la recolonización de las plantas (*abajo*, 2013).

CORTESÍA DE PSEG

De manera similar, Lewis está rescatando 400 hectáreas de manglar en la Reserva Nacional de Investigación Estuarina en la Bahía de Rookery, en el sudoeste de Florida. Una carretera costera construida en los años treinta del pasado siglo interrumpió gran parte del flujo natural de la marea. Como consecuencia, las fuertes lluvias inundan ahora el manglar y ahogan los árboles. Para corregir la hidrología, Lewis planea instalar grandes tajeas bajo la carretera y mondar los canales mareales para que las lluvias torrenciales desagüen con rapidez y las aguas del golfo fluyan con libertad durante la marea. De nuevo, el principal objetivo consiste en evitar que los árboles mueran. Pero el beneficio generado no acaba aquí: las mediciones demuestran que, en la primera fase de restauración en una superficie de 2,5 hectáreas, no solo ha mejorado la salud de los mangles, sino que ha habido un incremento sustancial del número de cangrejos violinistas y róbalos blancos. Cuando todo el proyecto concluya, «contaremos con unas poblaciones de peces sumamente valiosas en lugares donde habían desaparecido».

Los ejemplos de Guyana y Florida demuestran que la naturaleza puede hacer gran parte del trabajo de restauración si se regularizan las condiciones hídricas. En otros casos necesita más ayuda. La principal responsable de la pérdida de miles de hectáreas de carrizales que antaño salpicaban las orillas del lago Ontario ha sido una política de represamiento destinada a mantener elevado el nivel del lago para la navegación y la generación de energía hidroeléctrica. Sin los períodos de estiaje, la proliferación de aneas acabó con el rico ecosistema de carrizal. Ahora, las autoridades están sopesando un nuevo modelo de

Balance de la desaparición

50 % de humedales perdidos en Norteamérica, Europa y China desde 1900	**3,6 millones** de hectáreas de manglares destruidas en todo el mundo desde 1980
100.000 hectáreas de manglares desaparecen cada año	**74 %** de vegetación en los ecosistemas restaurados, en comparación con las zonas naturales conservadas

FUENTES: «STRUCTURAL AND FUNCTIONAL LOSS IN RESTORED WETLAND ECOSYSTEMS», D. MORENO MATEOS ET AL., EN *PLOS BIOLOGY*, VOL. 10, N.º 1, ARTÍCULO N.º E1001247, 24 DE ENERO DE 2012 (*cifras superior izquierda e inferior derecha*); «THE WORLD'S MANGROVES 1980-2005», ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, 2007 (*cifras superior derecha e inferior izquierda*)

gestión que permita un mayor descenso de los niveles del lago durante la temporada natural de estiaje.

El objetivo de recuperar los carrizos condicionó el segundo paso esencial: acabar con las aneas. Wilcox y sus estudiantes las cortan en primavera, cuando las plantas han agotado todas sus reservas de energía y la fotosíntesis no ha comenzado a reponerlas, y a continuación fumigan con un herbicida para acabar con los retoños que brotan.

UNA HISTORIA DE ÉXITO

La dedicación a un solo objetivo central ha cosechado magníficos resultados en la bahía de Delaware. En el pasado, el estuario se hallaba cubierto de marismas, un ecosistema muy rico en crustáceos, peces y demás fauna acuática. Los colonos holandeses levantaron diques y desecaron miles de hectáreas para el cultivo de espartillo forrajero. Hoy los campos sembrados con esta planta se destinan a la producción de mantillo exento de malas hierbas y relleno para ataúdes.

En la orilla perteneciente a Nueva Jersey se alza la central nuclear de Salem, propiedad del grupo energético PSEG. La industria succiona millones de litros de agua como refrigerante y mata millones de pececillos y otros animales diminutos a su paso por las válvulas de aspiración. A inicios de los años noventa, las autoridades estatales solicitaron a PSEG la construcción de torres de refrigeración para poner fin a la mortandad. Reacia a desembolsar mil o dos mil millones de dólares, la empresa propuso una alternativa: restaurar una superficie de marismas suficiente para compensar la pérdida de vida piscícola, esto es, más de 4000 hectáreas.

El a la sazón director de proyectos ambientales de PSEG, John Balletto, reunió un elenco de expertos en restauración. El equipo llegó a la conclusión de que la mejor manera de incrementar las poblaciones de peces de la marisma consistía en abrir vías en los diques para dejar paso al caudal de agua justo y necesario para crear un laberinto de canales mareales primarios y secundarios, que habían desaparecido. Era importante no excederse. «Si uno planifica una red de drenaje con todo detalle, el agua se ve forzada a circular por donde se cree que debería hacerlo», explica Teal, uno de los asesores. «Pero si se deja que tome su propio camino, hay más posibilidades de que el sistema se vuelva estable».

El equipo excavó los canales principales y algunos ramales laterales y dejó que el resto surgiera espontáneamente. La esperanza de que la naturaleza regeneraría con rapidez la marisma entera se cumplió. Hoy la abundancia de peces compensa las pérdidas provocadas por las captaciones de agua de la central nuclear. Y en opinión de Teal, las partes restauradas son prácticamente idénticas a las marismas naturales vecinas, a pesar de que el objetivo principal consistía en crear un entorno más favorable para la fauna piscícola.

PSEG sigue supervisando las marismas y resolviendo los problemas que surgen. «Han transcurrido veinte años y el seguimiento continúa», asegura Teal. «En la mayoría de las restauraciones, se regresa al cabo de uno o dos años y a veces el tercero, eso es todo». Hacerlo bien resulta costoso; el desembolso acumulado hasta hoy supera los 100 millones de dólares. Pero representa una cifra muy inferior a los mil millones de dólares que habrían costado las torres de refrigeración.

EL HIMALAYA DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

La restauración de miles de hectáreas de las marismas de la bahía de Delaware es una cosa, pero ¿podrán los científicos revertir lo que Phil Turnipseed, director del Centro Nacional de Investigación sobre Humedales de EE.UU., ha calificado como «la mayor tragedia ambiental, económica y cultural de Norteamérica», la pérdida del litoral de Luisiana? Los expertos aseguran que durante los últimos 80 años han desaparecido más de 460.000 hectáreas de marismas.

Tal vez pronto lo sepamos.

El estado ha elaborado el Plan Director para la Sostenibilidad de la Costa de Luisiana, de 190 páginas, con el fin de restaurar los humedales desecados y crear otros nuevos; básicamente, mediante la desviación de las cenagosas aguas del río Misisipi hacia las marismas y el litoral. Y como la región espera recibir un lluvia de millones de dólares del gigante petrolero BP en compensación por la marea negra de la plataforma Deepwater Horizon, «ahora disponemos del plan y del dinero, algo inaudito», afirma Steve Cochran, director de restauración del delta del Misisipi, del Fondo para la Defensa del Medioambiente.

El plan sigue la enseñanza de fijarse un único objetivo: restituir y conservar cientos de kilómetros cuadrados de tierra firme. La inquietud surge cuando se aprecia la magnitud del proyecto: centenares de veces más grande que cualquier otro anterior.

Si se hace bien, existe la posibilidad de proteger el litoral entero de los temporales y de revitalizar una vasta y rica región productiva que John Day, catedrático emérito de ecología litoral de la Universidad de Luisiana, describe como «el Himalaya de los servicios ecosistémicos». Si se hace mal, el ascenso del nivel de las aguas del golfo de México volverá a convertir Nueva Orleans en una Atlántida moderna y anegará permanentemente el hogar de cientos de miles de personas en la costa devastada. «No hay margen de error posible», sentencia Day.

El ejemplo que sirve como modelo de restauración es el delta del antiguo lago Wax, una extensa zona de nuevas marismas creada al sudoeste de Morgan City, Luisiana, cuando el Cuerpo de Ingenieros del Ejército desvió el río Atchafalaya en 1942. «Es una zona preciosa, con una fantástica diversidad de matices y salcedas que cubren las márgenes», asegura Denise Reed, responsable científica del recién creado Instituto del Agua del Golfo, en Baton Rouge. «El suelo es realmente firme, se puede saltar sin temor sobre él».

Reed y otros diseñadores del plan director calculan que con derivaciones similares será posible crear 1000 kilómetros cuadrados de nuevos humedales en medio siglo. Algunos escépticos como Gene Turner, de la Universidad de Luisiana, denuncian que la cifra es demasiado optimista. Sostienen que, incluso en condiciones perfectas para la acumulación de tierras, el registro histórico evidencia una ganancia que apenas alcanza una quincuagésima parte de lo calculado por los modelos del plan. Algunas derivaciones construidas a modo de prueba hace una década o más no han generado ganancia alguna. «Podrían estar desperdiciando un montón de recursos en proyectos que han demostrado ser erróneos», asegura.

La opinión de Turner resulta minoritaria. Los datos, en cambio, demuestran la importancia de aportar el tipo y el volumen correctos de sedimentos. El delta del lago Wax se levanta sobre un lecho de sedimentos arenosos de 2 a 4 metros de espesor extraídos de zanjas profundas abiertas en los terraplenes naturales del río. Una excavación más somera solo extraería el fino sedimento orgánico, que el próximo huracán probablemente engulliría con facilidad. Otra complicación es que el río Misisipi acarrea los nutrientes erosionados de las tierras de cultivo del Medio Oeste, que hacen que las plantas prosperen en la marisma recién creada sin desarrollar raíces profundas que estabilicen el suelo; el terreno precario se muestra así muy vulnerable a los temporales. Por esta razón, Turner y otros prefieren una solución distinta a las desviaciones de los cursos fluviales: rellenar los canales abiertos por las petroleras con el material dragado de las márgenes de los canales para frenar la lenta infiltración del agua salada y facilitar el arraigo de la vegetación. Si el acarreo masivo de sedimentos tendrá éxito o resultará insuficiente es una controversia candente, en que ambas partes tienen algo de razón, explica Cochran. Pero el tiempo se acaba. La mayoría está de acuerdo en que hay que actuar sin tardanza o no quedarán humedales naturales por restaurar; la demora también significa que no habrá margen para enmendar ningún traspié.

Del mismo modo que la capa un poco más gruesa de arcilla provocó las diferencias en los minúsculos humedales de Wisconsin creados por Zedler, los pormenores decidirán el resultado en Luisiana y en otros proyectos de restauración dispersos por el mundo. Y pese a que los retos siguen siendo abrumadores, Zedler está motivada por los grandes avances en el conocimiento de lo que se debe hacer. «No podemos dar marcha atrás al reloj, pero tampoco podemos desistir del intento», asegura.

PARA SABER MÁS

Structural and functional loss in restored wetland ecosystems. D. Moreno Mateos et al. en *PLOS Biology*, vol. 10, n.º 1, artículo n.º e1001247; 24 de enero 2012.

Creating wetlands: Primary succession, water quality changes, and self-design over 15 years. William J. Mitsch et al. en *BioScience*, vol. 62, n.º 3, págs. 237-250; marzo 2012.

Wetland creation and restoration. William J. Mitsch en *Encyclopedia of Biodiversity*. Segunda edición. Coordinada por Simon Levin. Academic Press, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Humedales. Jon A. Kusler, William J. Mitsch y Joseph S. Larson en *IyC*, marzo de 1994.

Límites de la restauración de humedales. David Moreno Mateos en *IyC*, agosto de 2015.



ARQUEOLOGÍA SUBMARINA

GRACIAS A TÉCNICAS INNOVADORAS, LOS CIENTÍFICOS PUEDEN EXPLORAR NAUFRAGIOS CON LA MISMA PRECISIÓN QUE EN UNA EXCAVACIÓN ARQUEOLÓGICA

EL INTERIOR DEL EXOSUIT se mantiene durante horas a presión atmosférica aun a profundidades de 300 metros. Edward O'Brien ha sido la primera persona en explorar el océano con este traje.

En busca de tesoros sumergidos

Philip J. Hilts

Philip J. Hilts es escritor científico, autor de seis libros y anterior reportero galardonado del *New York Times* y el *Washington Post*. Fue director del programa Knight de periodismo científico en el Instituto de Tecnología de Massachusetts de 2008 a 2014.



Hace dos mil años, una tempestad embistió a un barco romano contra las rocas de un acantilado en la costa norte de la remota isla griega de Anticitera. La embarcación naufragó junto con toneladas de objetos preciados: monedas, joyas de oro, decenas de enormes estatuas de mármol y bronce, y un extraordinario artefacto de relojería tallado en bronce considerado hoy el primer ordenador analógico.

Situados a cincuenta metros de profundidad, los restos del naufragio aguardaban intactos en el fondo del mar hasta que un buen día del año 1900 unos buscadores de esponjas tropezaron con él. El equipamiento de los buceadores se reducía a un casco y una manguera alargada por la que respirar el aire de la superficie. El mero acceso a los restos del navío suponía un gran esfuerzo para ellos. Uno perdió la vida y dos quedaron paralíticos.

Hasta 1976 no se realizó una segunda expedición al lugar. Jacques Cousteau y su equipo exploraron el yacimiento mediante un equipo estándar de submarinismo. Con el fin de reservar un tiempo para el ascenso, que debía realizarse lentamente para evitar «el mal de las profundidades», o «de los buzos» (la rápida expansión del nitrógeno en el cuerpo que puede destruir los nervios y causar la muerte), los buceadores solo podían permanecer en el fondo unos preciados minutos en cada inmersión.

Sin embargo, la limitación del tiempo en el fondo del mar pasó a la historia en octubre de 2014 durante una nueva expedición en Anticitera. El explorador Phillip Short descendió desde la popa de un barco prestado, el *Petros Iro*, pertrechado con un sistema de respiración informatizado dotado de múltiples tanques conocido como reciclador de circuito cerrado. Este equipamiento, que reduce la velocidad a la que el nitrógeno se acumula en los tejidos, le permitió pasearse por el barco naufragado durante una hora y media antes de regresar. Aun así, una inmersión tan prolongada sigue implicando un ascenso lento; Short se había llevado una revista para poder leer durante las paradas planeadas en su camino hacia la superficie. A lo largo de dos semanas de inmersiones, el equipo descubrió todo tipo de objetos incrustados en los restos, desde jarras de cerámica de doble asa hasta una lanza de bronce de dos metros de longitud.

Después de que Short y otros exploradores hubieran realizado varios viajes de ida y vuelta, Edward O'Brien, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, puso a prueba una técnica aún más innovadora. A bordo del *Thetis*, un barco de la marina griega, se introdujo en un reluciente caparazón musculado denominado Exosuit que le confería un aspecto a caballo entre Iron Man y Buzz Lightyear. A las 10:40 de una mañana de domingo, lo

EN SÍNTESIS

Los avances técnicos permiten a los exploradores detectar y cartografiar con mayor rapidez yacimientos de naufragios y desenterrarlos con la precisión empleada en las prospecciones arqueológicas.

El uso de recicladores de aire para explorar las ruinas de Anticitera, en las costas de Grecia, permitió a los submarinistas permanecer sumergidos a 50 metros de profundidad hasta 90 minutos, en lugar de los 8 que admite un equipo estándar de submarinismo.

Gracias al traje metálico Exosuit, los submarinistas trabajan sumergidos manteniéndose a presión atmosférica y se ahorran el lento ascenso requerido para evitar la «enfermedad de los buzos».

La técnica, perfeccionada en Pavlopetri y las islas Egadas, otros dos yacimientos mediterráneos, también agiliza y abarata la exploración subacuática, y facilita que un mayor número de investigadores se aventure a desenterrar antiguos naufragios y ciudades sumergidas.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE BRETT SEYMOUR, INSTITUTO OCEANOGRÁFICO WOODS HOLE (*izquierda*); CORTESÍA DE BRETT SEYMOUR, ARGO (*derecha*)



TRES ANTIGUOS NAUFRAGIOS han servido como terreno de prueba para un refinado equipamiento que confiere a la arqueología oceánica mayor rapidez y precisión. El Exosuit (*véase la fotografía inicial*) se utilizó por primera vez en octubre de 2014 en el yacimiento de Anticitera.

bajaron primero desde el *Thetis* hasta la superficie del mar y después lo hicieron descender 60 metros hasta dejarlo junto al yacimiento. El interior del traje se mantiene a presión atmosférica y permite así a los buceadores permanecer sumergidos durante horas y ascender de forma inmediata sin necesidad de parar... o de leer. «No tienes la sensación de presión o de profundidad —resaltó O'Brien tras un eufórico retorno al barco—. Te sientes igual a quince metros que a sesenta, solo que a sesenta la oscuridad es mayor.»

El equipamiento empleado por Short y O'Brien da una muestra del alcance de las técnicas de las que disponen hoy los científicos marinos. Los investigadores están adaptando las innovaciones que emergen en otros campos para ampliar sus propias capacidades de exploración. El Exosuit, por ejemplo, se había diseñado originalmente para trabajadores que debían caminar por túneles de abastecimiento de agua y alcantarillado, en ocasiones kilométricos, pero la empresa J. F. White Contracting lo ha adaptado a la arqueología submarina.

El resultado es que hoy se han hecho más accesibles muchos yacimientos de gran valor que antes eran difíciles de alcanzar, y los descubrimientos que hasta hace poco suponían años de exploración se realizan ahora en cuestión de semanas. En Pavlopetri (Grecia), el yacimiento de la ciudad portuaria sumergida más antigua que se conoce, los submarinistas bucearon a escasos metros de profundidad empujando un pequeño sistema óptico de cartografía que tomaba miles de fotografías digitales tridimensionales. Un programa informático las ensambló y reveló un mundo sumergido de casas, calles, centros comerciales y tumbas que configuraban el asentamiento costero hace 4000 años. En unas excavaciones próximas a las islas Egadas, frente a las costas de Sicilia, donde unos barcos romanos y cartagineses se habían hundido en 241 a.C. durante la última batalla de la primera guerra púnica, las imágenes de sónar localizaron más de una docena de naufragios. Una serie de submarinos robóticos dotados de ágiles y fuertes tenazas se hicieron con todo tipo de equipamiento de batalla y lo izaron hasta la superficie.

Durante más de una semana realicé continuos viajes entre las costas de Anticitera y los barcos de un equipo de submarinistas y miembros de una expedición. Una tarde, Brendan Foley, arqueólogo marino del Woods Hole y director del proyecto, se sentó conmigo para concederme una entrevista en un fresco almacén situado junto al muelle, al pie de los acantilados. A sus espaldas colgaba en la pared el trofeo obtenido tras los primeros días de exploración: una enorme impresión del primer mapa fotográfico del yacimiento. «Nos encontramos ante el comienzo de una nueva era», afirmó.

«Podemos estudiar una mayor extensión de terreno con mayor rapidez y precisión. Y no hay que perder de vista que los barcos naufragados constituyen yacimientos arqueológicos congelados en el tiempo. No son como los yacimientos al aire libre», continuamente asaltados, reconstruidos y arrasados de una forma o de otra. Antiguamente, por ejemplo, solían fundirse estatuas de bronce para construir cañones; en el fondo del mar, en cambio, pueden encontrarse íntegras. De hecho, la mayor parte de las mejores estatuas antiguas que se exhiben en los museos no proceden de la tierra sino del mar.

El hecho de que el tiempo se congele en los barcos naufragados hace que los objetos que han permanecido intactos durante miles de años puedan ampliar nuestro conocimiento sobre las sociedades pasadas desde un punto de vista cultural y científico. Hoy existen más oportunidades de ver el sueño hecho realidad. «Trabajar bajo el agua ha supuesto siempre un problema en

LASZLO KUBINYI (*mapa*)

arqueología marina —comenta Jon Henderson, arqueólogo de la Universidad de Nottingham y codirector de la expedición de Pavlopetri—. Ya no es una barrera. La hemos superado.»

ROBOTS CARTÓGRAFOS

El potencial de las nuevas técnicas es tal que dispara los sueños más ambiciosos. Uno de ellos consiste en cartografiar regiones enteras del fondo marino profundo con relativa rapidez empleando una modesta flota submarina de vehículos robóticos autónomos. Si por él fuera, Foley cartografiaría la totalidad del terreno bajo el mar Egeo, entre Creta y la Grecia peninsular. El área ha constituido una zona de intenso tráfico marítimo durante 5000 años, y unos robots provistos de sónar deberían poder detectar con facilidad cualquier tesoro enterrado en el fondo. En un experimento, Foley halló, confirmó y grabó en vídeo diez posibles barcos naufragados en tan solo diez días.

Antes, los arqueólogos marinos debían cartografiar laboriosamente posibles yacimientos mediante una serie de herramientas manuales: cintas métricas y armazones de madera y cuerda para elaborar cuadrículas que indicaran dónde podrían hallarse los objetos y cómo podrían relacionarse unos con otros. Cartografiar y excavar a más de 30 metros de profundidad pronto se convirtió en un problema, ya que los buceadores solo podían permanecer unos pocos minutos sumergidos antes de tener que ascender de nuevo.

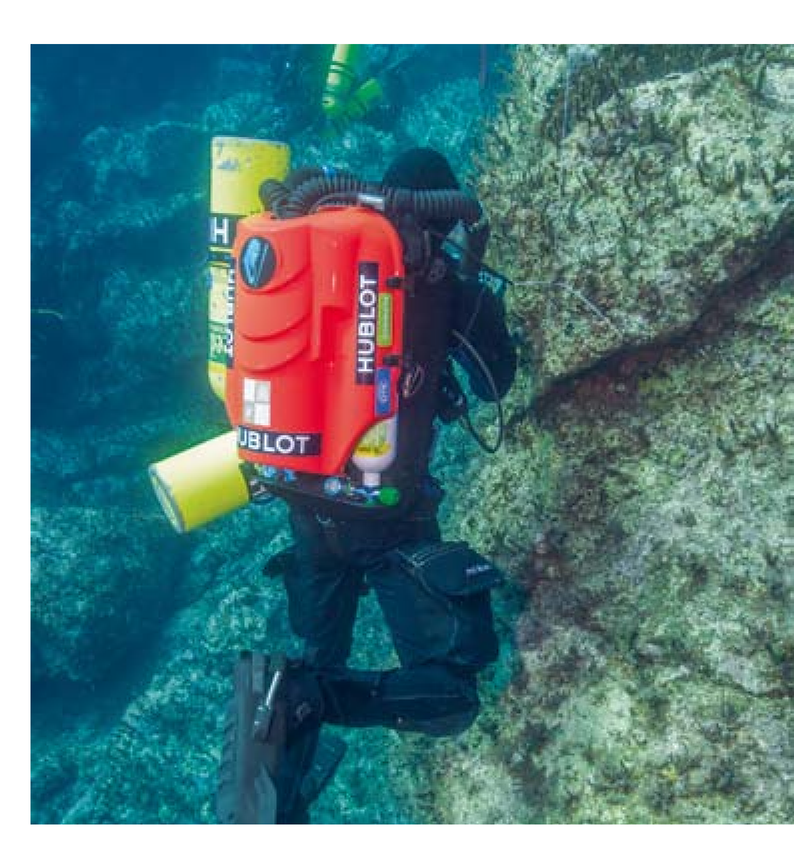
Desde la popa de un pequeño barco en las costas de Anticitera, un equipo de ingenieros de la Universidad de Sídney introdujo en las cristalinas aguas del Egeo una especie de tándem de torpedos amarillos. A continuación, liberaron el robot para que alcanzara el fondo. El jefe de equipo, Óscar Pizarro, no tenía que dirigir el vehículo autónomo submarino, de nombre Sirius, ya que el aparato seguía por su cuenta una misión preprogramada. Buceando a tres metros por encima del yacimiento, Sirius completó 40 trayectos paralelos (como una cortadora de césped) mientras disparaba luces estroboscópicas a lo largo de su recorrido con el fin de iluminar el fondo para sus cámaras estereoscópicas. El vehículo conocía su posición con un margen de casi un metro gracias a una señal GPS, pero más precisa todavía era la información que obtenía sobre la ubicación de cada roca, inclinación o abultamiento del terreno, a partir de la combinación de los datos procedentes de cada imagen con los datos de su velocidad, profundidad y orientación. Cada pequeña porción de información se empleaba para realizar correcciones y ajustes. Si, por ejemplo, en una imagen se apreciaba una sombra detrás de una roca, otra imagen tomada desde otro ángulo rellenaba esa zona.

Aunque para retratar por entero el antiguo naufragio habría bastado una sesión de tres horas, más alguna hora adicional de trabajo computacional, el equipo repitió la operación dos veces con la intención de obtener una mayor resolución. La imagen final ensamblada consta de 50.000 fotografías individuales de precisión milimétrica; y es tridimensional, así que puede inclinarse y ofrecer una visión lateral.

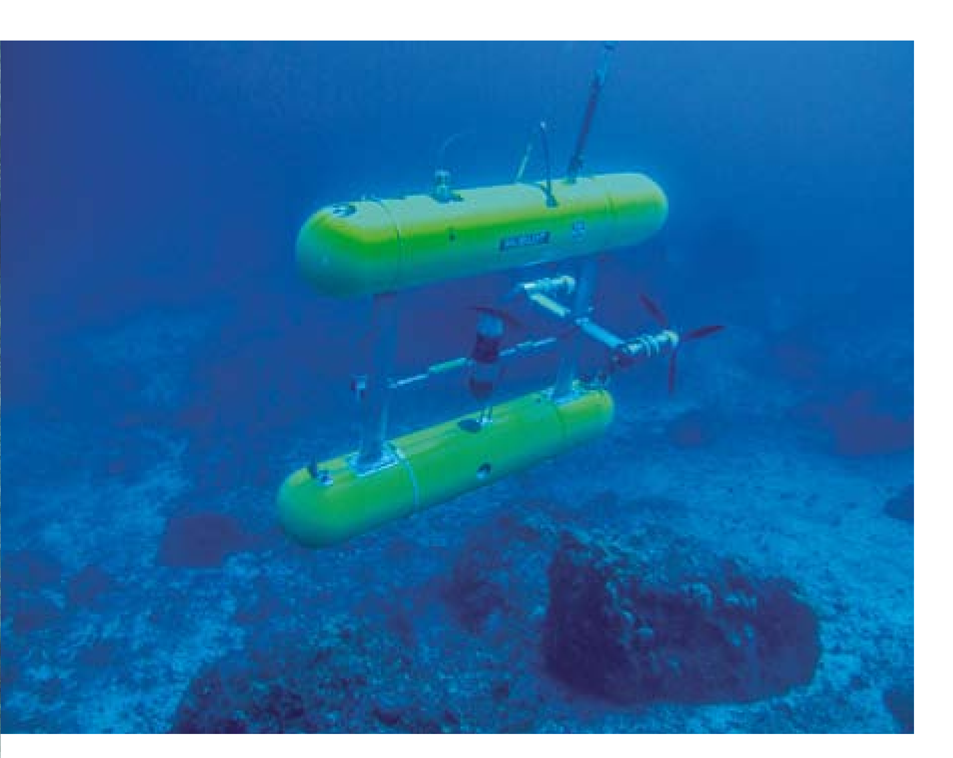
Stefan Williams, miembro del equipo, señala que unos pocos años atrás se había tardado más de diez meses en completarse una misión de alcance similar en otro lugar. Su equipo la llevó a cabo tres veces en un solo fin de semana.

AIRE RECICLADO

Una vez completada la cartografía, los buceadores podían descender a puntos concretos tantas veces como desearan. Los buscadores de esponjas que habían alcanzado el fondo en 1900







EL RECICLADOR transportado por Phillip Short (*tanque rojo; izquierda, arriba*) reduce la acumulación de nitrógeno que puede provocar parálisis en los submarinistas; ello le concede el tiempo necesario para desenterrar una lanza de bronce de dos metros de longitud (*izquierda, abajo*). Unos vehículos autónomos (*arriba*) son capaces de elaborar con rapidez y precisión la cartografía de grandes extensiones de terreno y guiar así a los exploradores hacia el tesoro.

CORTESÍA DE BRETT SEYMOUR, ARGO (*página anterior*), CORTESÍA DE PHILLIP SHORT, ARGO (*vehículo autónomo*)

apenas habían permanecido tres minutos en el lugar, pero fueron suficientes para recuperar un antiguo ordenador analógico, hoy conocido como el mecanismo de Anticitera. El buceo profundo resulta peligroso porque la elevada presión del agua causa la compresión de los gases en los tejidos humanos hasta que ocupan una mera fracción de su volumen habitual. Las células compensan la presión rellenando el tejido con el aire respirado por los submarinistas, contenido en unos tanques que los buceadores llevan consigo. Por tanto, durante el buceo profundo el cuerpo debe resistir un gran volumen de aire, sobre todo nitrógeno. Cuanto más tiempo pasa una persona sumergida bajo el agua, más se acumulan los gases.

El mayor peligro reside en que, cuando los submarinistas comienzan el ascenso, los gases de los tejidos pueden liberarse y expandirse, como en el burbujeo de una botella abierta de refresco. Es fundamental que asciendan despacio para que los gases se liberen lentamente; si remontan su camino demasiado rápido, pueden formarse burbujas en la sangre que obstruyan la circulación de los vasos sanguíneos más pequeños y paralicen así nervios y órganos. El nitrógeno es particularmente problemático [*véase* «Fisiología de la enfermedad por descompresión», por Richard E. Moon, Richard D. Vann y Peter Bennett; Investigación y Ciencia, octubre de 1995].

En el reducido espacio del bote, Short forcejeaba con casi el doble de equipamiento del que hubiera llevado en una inmersión normal de buceo y tenía que hacer acrobacias para ponérselo. En lugar de una simple botella de aire, como en el submarinismo estándar, Short se echó a la espalda un reciclador compuesto por dos tanques cilíndricos: uno contenía oxígeno y el otro trimix, una mezcla de helio, oxígeno y nitrógeno. El reciclador recoge las exhalaciones del buceador, retira el dióxido de carbono e inyecta oxígeno para reponer el consumido por el submarinista. Un programa informático controla la concentración de oxígeno para crear una mezcla personalizada de gases en cada momento de la inmersión.

Cada tarde se dedicaba una hora al mantenimiento, la limpieza y la reinstalación de aquel equipamiento de alta tecnología. «Reconozco que para eso soy un poco obsesivo. Tiene que estar perfecto —comenta Short arrodillándose junto a los tanques y la pantalla digital de muñeca que los maneja—. Mientras todo vaya bien, no hay problema. Pero debes estar alerta y preparado para reaccionar cuando algo falla, como la electrónica, por ejemplo. Necesitas un entrenamiento especial para posibles emergencias.»

LA LANZA DE SOTIRIOU

Una técnica menos puntera pero de gran utilidad cuando se realizaron las primeras inmersiones fue el detector submarino de metales. Al cabo de 2000 años, la madera de los barcos ha desaparecido casi en su totalidad y la mayor parte de los artefactos se han conservado enterrados en la arena y los sedimentos. Muchos de los objetos han quedado «cementados», es decir, revestidos de carbonato de calcio y otros minerales que les confieren el aspecto de enormes rocas blancas.

Como en el caso de la prospección terrestre, el detector submarino, en forma de varita, emite un quejido cuando halla un objeto metálico. En pocos días, los buceadores obtuvieron una serie de señales intensas y colocaron piedras pintadas de amarillo para identificar los puntos donde buscarían más adelante.

Tras unos días de vientos de casi 50 kilómetros por hora y olas de 2,5 metros, el buceador Alex Sotiriou regresó a las áreas marcadas y comenzó a excavar. En ese momento, todos los inconvenientes del agua se compensan con una gran ventaja. El suelo seco suele ser duro y requiere que los arqueólogos deban retirar el material lentamente con palas, paletas y cepillos para desenterrar los objetos. Pero bajo el mar, el «suelo» es blando y fácil de desmantelar solo con que el buceador deslice la mano. Se pueden cavar zanjas sin dificultad y es posible succionar el limo y la arena con mangueras y verterlos en otra parte. Sotiriou retiró unos centímetros de limo con un solo golpe de guante. Tras el segundo golpe, apareció el extremo de una lanza de bronce. Continuó retirando material a lo largo del mango hasta alcanzar la gran punta afilada. La lanza intacta medía en total dos metros de longitud.

Los arqueólogos del equipo consideran que la lanza es demasiado pesada para haber sido utilizada como arma y que, probablemente, la agarraba un colosal guerrero de bronce, todavía enterrado en el yacimiento. Los submarinistas también subieron a la superficie una jarra de terracota roja de medio metro de altura, probablemente utilizada para servir vino. Hallaron también un anillo de bronce empleado para atar la jarcia del barco, así como dos anillos decorativos de una cama romana. Los buceadores transportaban los artilugios de menor tamaño



en bolsas de mano. Para trasladar las piezas más voluminosas, como la lanza, desempaquetaban unos tubos planos que habían llevado consigo, los inflaban con el aire de uno de los tanques de respiración y los ataban a los objetos antes de subirlos cuidadosamente hasta el barco.

Los hallazgos más interesantes, sin embargo, se encontraban a unos 180 metros de distancia, suficientemente lejos del yacimiento principal como para que los buceadores interpretaran que habían encontrado un segundo barco que podría haber navegado junto con el primero. En él descubrieron una segunda ancla, el fragmento de un tubo de plomo que pudo haber pertenecido a la bomba de achique del navío y unas vasijas amontonadas que parecían como si nadie las hubiera tocado nunca. La forma y las marcas que presentaban indicaban que procedían de cuatro puertos: Pérgamo, Éfeso, Cos y Rodas, las mismas cuatro variedades que se habían hallado en el barco principal.

1531
PRIMERA CAMPAÑA DE BUCEO
Unos cazadores de tesoros se introducen en el interior de unas toscas campanas para rastrear el fondo de un lago cerca de Roma en busca de dos barcos enjoyados construidos para el emperador Calígula. La campana, en forma de barril, se lleva sobre el cuello y los hombros, y atrapa aire suficiente para poder buscar durante una hora.

1620
CONSTRUCCIÓN DEL PRIMER SUBMARINO
Una docena de hombres impulsan el primer submarino del mundo mediante unos remos que sobresalen a través de unos agujeros laterales sellados con cuero. El inventor holandés Cornelis Drebbel dirige los ensayos en el río Támesis ante el rey de Inglaterra.

1691
BARRILES DE OXÍGENO
El inglés Edmond Halley, más conocido por el cometa que lleva su nombre, aumenta el suministro de aire en las campanas de buceo reponiéndolo con unos barriles ponderados de oxígeno enviados al fondo.

1715
TRAJE CON IMPERFECCIONES
El inglés John Lethbridge crea un primer traje de buceo que asemeja un barril horizontal con sisas selladas con cuero. No alcanza grandes profundidades debido a la diferencia de presión entre el torso y las extremidades.

1788
MEJORA DE LA CAMPAÑA DE BUCEO
El americano John Smeaton incorpora un tanque de almacenamiento de aire dotado de una bomba manual que permite la entrada de aire a través de una manguera que comunica con la superficie. Una válvula unidireccional impide que el aire ascienda de nuevo.

1859-1867
UN SUBMARINO DE DOBLE CASCO
El catalán Narcís Monturiol concibe un submarino de doble casco, el *Ictíneo*. El externo, en forma de pez (hidrodinámico); el interno, cilíndrico. Idea un sistema de renovación del aire que prolonga el tiempo de inmersión e introduce un «motor submarino» adaptando una máquina de vapor cuyo combustible no desprende gases tóxicos.

1864
EL PULMÓN DE ACERO INSPIRA EL SUBMARINISMO
Los franceses Benoît Rouquayrol y Auguste Denayrouse patentan el Aeróforo, una forma incipiente de submarinismo. El buceador inspira aire desde un tanque a través de una membrana y una válvula. El tanque se rellena de aire superficial que se bombea mediante una manguera.

1870-1880
PRIMER RECICLADOR DE AIRE
El inglés Henry Fleuss inventa un reciclador: un sistema de circuito cerrado que suministra al buceador oxígeno comprimido, a la vez que absorbe el dióxido de carbono espirado mediante una cuerda empapada en potasa cáustica.

Emocionado cuando, una vez en tierra firme, se confirmaron los orígenes de los objetos, Theotokis Theodoulou, jefe de expedición del Eforato Griego de Antigüedades Submarinas, declaró que «este lugar todavía guarda muchos secretos. Queremos regresar una y otra vez para descubrirlos».

EL PRODIGIOSO EXOSUIT

De llevarse a cabo un segundo viaje, la investigación podría progresar a un ritmo todavía más rápido gracias al avance técnico que más ha estado en boca de todo el mundo y que se inauguró en la exploración de Anticitera: el Exosuit.

El 7 de octubre de 2014, tras dos semanas de demora a causa de un viento desapacible, O'Brien, ataviado con el Exosuit, saltó por la borda del *Tethis* y mediante un cable lo bajaron hasta situarlo por debajo de la superficie del mar. Se trataba de la primera misión en la que se utilizaba el traje diseñado por Nuytco Research. «La primera vez en agua salada», remarcó Jim Clark, de J. F. White Contracting, propietario de la armadura.

Una vez dentro del agua, los operadores desconectaron el cable y el investigador descendió 60 metros de profundidad hasta alcanzar el fondo y situarse cerca del naufragio. Allí puso el traje a prueba. El Exosuit está dotado de 18 junturas flexibles que permiten realizar movimientos naturales con los brazos, las piernas y el torso. Si lo necesitaba, O'Brien podía arrodillarse, acostarse boca abajo y adoptar otras muchas posturas en las que suelen trabajar los submarinistas.

La verdadera emoción no radicaba en la fuerza o la agilidad del traje sino en el hecho de que mantenía a su ocupante humano a presión atmosférica durante toda la inmersión: ni gases

1900

LA MARINA CONSTRUYE UN SUBMARINO

El inmigrante irlandés John Holland construye un submarino moderno impulsado por gasolina y electricidad para la marina de EE.UU. Su modelo, el *Holland*, goza enseguida de popularidad; durante la primera guerra mundial debutan embarcaciones similares en las marinas de todo el mundo.

1919

LA GUERRA IMPULSA EL USO DEL SÓNAR

Las marinas británica y francesa idean un sistema de sónar para detectar submarinos. Se instala en destructores durante las dos décadas siguientes.

1934

INMERSIÓN EN UNA BOLA DE ACERO

Dos hombres en el interior de una esfera de acero llamada batisfera, de dos toneladas y media de peso, sitúan el récord de profundidad de inmersión en ochocientos metros. Desde el barco, un cable de acero los hace descender y ascender mientras que un segundo cable hace funcionar el teléfono y las luces y un tubo les suministra el aire.

1943

LOS BUCEADORES RESPIRAN HONDO

Se pone a la venta el regulador Aqua-Lung, diseñado por el explorador Jacques Cousteau y el ingeniero Emile Gagnan. Este nuevo dispositivo incorpora un regulador automático para suministrar aire fresco al buceador cada vez que respira. Sigue siendo el sistema básico empleado por los submarinistas actuales.

1955

LA DETECCIÓN DE METALES HALLA LAS PLACAS TECTÓNICAS

Los científicos exploran el fondo oceánico mediante un detector submarino de metales llamado magnetómetro, arrastrado por un barco. Las expediciones registran un patrón de bandas de metales subsuperficiales que permiten datar el fondo oceánico y aportan pruebas a la teoría de la tectónica de placas.

1960

EL HOMBRE ALCANZA LA MÁXIMA PROFUNDIDAD

El buque *Trieste* de la marina estadounidense, un batiscafo de unos dos metros de diámetro provisto de un depósito de gasolina de 15 metros en la parte superior, alcanza —pese a tener una ventana rota— el punto de mayor profundidad oceánica, el fondo de la fosa de las Marianas, situado a 11,2 kilómetros bajo la superficie.

1960-1970

DESPLIEGUE DE ROBOTS

La marina de EE.UU. financia el desarrollo de vehículos teledirigidos: robots subacuáticos manejados por control remoto desde un barco para tomar datos o explorar virtualmente restos de naufragios.

1970-1980

MÁQUINAS AUTÓNOMAS

La Universidad de Washington utiliza un vehículo subacuático autónomo en el Ártico. Está programado para recoger datos y completar misiones sin ayuda de un operador humano. El avance que supone el uso de vehículos autónomos y teledirigidos ha puesto el 98 por ciento del suelo oceánico al alcance de la mano de los científicos.

1980

VÍDEOS SUBACUÁTICOS

Robert Ballard, descubridor del *Titanic*, crea una cámara subacuática que retransmite por fibra óptica un vídeo en directo que puede ser visto en superficie por científicos y educadores.

2014

LOS SUBMARINISTAS GANAN FLEXIBILIDAD

Un equipo que explora un naufragio en Grecia prueba el Exosuit, un traje acorazado cuyo interior se mantiene a presión atmosférica, lo que permite a los submarinistas alcanzar profundidades de 300 metros y permanecer sumergidos hasta 40 horas.

—Amy Nordrum

comprimidos en el cuerpo ni lesiones a causa de la descompresión.

Tras ascender hasta la superficie en cuestión de minutos y salir del Exosuit en la cubierta del barco, O'Brien me comentó junto a la borda que la experiencia era totalmente distinta a una inmersión de submarinismo estándar. Ese mismo día, el oficial Fotis Lazarou, de la marina griega, descendió con el traje hasta 60 metros de profundidad.

Hecho de metal y materiales sintéticos, el Exosuit pesa en tierra más de 225 kilos, pero en el agua es tan ligero como una pluma y presenta casi flotabilidad neutra. Puede mantener a un submarinista a presión atmosférica hasta una profundidad de 300 metros y, por tanto, permite ampliar enormemente el abanico de profundidades a las que el hombre puede trabajar sin necesidad de estar atrapado en un sumergible.

Los arqueólogos ya comienzan a considerar el empleo del Exosuit para explorar vastas áreas inalteradas del fondo marino, por debajo de las profundidades a las que se practica la pesca de arrastre, unos 90 metros. En futuras inmersiones, el traje contará con una manguera de succión, especialmente diseñada, que permitirá a su piloto humano succionar arena y limo del naufragio durante horas. Los investigadores esperan utilizar el Exosuit en una nueva misión para continuar con la excavación de Anticitera.

UN PROTOTIPO EN PAVLOPETRI

Con anterioridad, una serie de campañas habían sentado las bases para explorar Anticitera. En realidad, el precursor del vehículo robot Sirius se había diseñado para la expedición de Pavlopetri, cuyo objetivo era estudiar unas estructuras inusuales observadas entre 3 y 4,5 metros de profundidad a lo largo de la costa sur de Laconia, en el extremo de la península del Peloponeso. Las ruinas se habían descubierto en 1968 pero solo se había realizado una cartografía muy tosca y una excavación parcial. En 2009, el arqueólogo Jon Henderson las examinó con mayor detalle.

Los ingenieros instalaron dos cámaras de alta resolución en una estructura en forma de caja que los buceadores empujaron a lo largo de una serie de recorridos solapados por encima de las

estructuras. Combinando los millares de imágenes obtenidas con la información sobre la velocidad y la posición del dispositivo, un programa informático construyó un fotomosaico del fondo, todo en ausencia de cuerdas y cintas medidoras.

El fotomosaico supuso la primera representación real de lo que se hallaba en el fondo: una ciudad entera con calles trazadas entre 15 edificios, habitaciones llenas de vasijas y tumbas. La extensión del conjunto superaba 8000 metros cuadrados. La datación de los objetos determinó que la parte más antigua de la ciudad de Pavlopetri tenía unos 4000 años de antigüedad. Las ruinas constituían el primer asentamiento subterráneo en ser cartografiado digitalmente y modelado en tres dimensiones. Henderson contó con Simon Clarke, experto en animación por ordenador que había trabajado en películas de *Harry Potter*, para dar el toque final: la creación de una animación de vídeo basada en los resultados de la investigación con el fin de recrear un paseo y un recorrido a vista de pájaro por la ciudad con el aspecto que había tenido una vez.

MATANZA EN CARTAGO

Las expediciones a las islas Egadas entre 2005 y 2013 constituyen otro ejemplo de exploración arqueológica submarina pionera en cuanto al empleo de nuevas técnicas.

La antigua ciudad de Cartago controló durante años rutas comerciales de capital importancia entre África y la actual Italia. Sus enormes barcos de remos derrotaban constantemente a los barcos romanos, sobre todo embistiendo contra los navíos enemigos con un enorme espolón de bronce fijado en la proa. En el año 241 a.C., los romanos construyeron su propia flota con espolones para contraatacar. Unos 200 barcos de guerra romanos arremetieron contra cientos de barcos de guerra y cargueros cartagineses. Según el historiador Polibio, el enfrentamiento fue «la guerra más encarnizada de la historia». Pero no especificó dónde había tenido lugar.

La Oficina del Superintendente de Arqueología Subacuática en Sicilia contó con el arqueólogo italiano Sebastiano Tusa y Jeffrey Royal, de la Fundación Náutica RPM de Florida, para buscar el campo de batalla. En algunos documentos antiguos se insinuaba que se encontraba justo al este de la isla de Levanzo, pero los restos de los naufragios podrían haberse diseminado por una extensión de 260 kilómetros cuadrados a una profundidad de hasta 90 metros.

Tusa y Royal comenzaron su exploración multianual a bordo de un buque de investigación que realizaba recorridos de ida y vuelta equipado con una sonda náutica en su casco. Dicho «sónar de haces múltiples» disparaba 500 señales cada vez, a razón de 40 pulsos por segundo. Las reflexiones de las ondas sonoras en el fondo marino dibujaban un mapa aproximado de aquella enorme superficie. Los investigadores examinaron los ecos que parecían indicar la presencia de objetos y distinguieron un conjunto de naufragios, desde aeroplanos modernos a barcos antiguos. Pero la precisión de los puntos era relativamente baja.

Tras un largo análisis, el equipo regresó con un sónar más preciso denominado escáner sectorial. Lo bajaron en un trípode hasta un posible yacimiento para obtener una imagen más clara y detallada; las formas fantasmales que recogían eran más fáciles de interpretar. Si el equipo consideraba que determinados objetos podían ser relevantes, enviaba un submarino robótico teledirigido dotado de cámaras para localizarlos. A bordo del barco, los miembros de la expedición observaban a través de una conexión de vídeo lo que el robot veía en cada momento. Si hallaban un objeto, maniobraban por control remoto los brazos mecánicos del robot, provistos de unas tenazas en los extremos, para tratar de arrancar la reliquia de los escombros y llevarla hasta la superficie.

Sin embargo, no fue hasta el mismo final de la campaña de prospección de 2010 cuando Tusa y Royal dieron con lo que estaban buscando: los restos de un barco con un espolón. A lo largo de los tres años siguientes hallaron ocho barcos más con espolones, unos romanos y otros cartagineses, y recuperaron las nueve puntas de bronce, que mostraban huellas de haber pertenecido a la época de la batalla naval. Los espolones aportan una valiosa información sobre los artefactos bélicos marinos en aquellos tiempos: estaban fijados en la proa de los barcos de remos a nivel de la superficie del mar y presentaban tres hojas anchas afiladas dispuestas en horizontal, diseñadas para romper el casco de un barco al golpearlo.

DESCONGELAR EL TIEMPO

El alcance de la tecnología punta en arqueología oceánica se está expandiendo a gran velocidad. Gracias a los recicladores de circuito cerrado o los trajes Exosuit, los submarinistas pueden descender centenares de metros y permanecer sumergidos durante horas. Los vehículos robot, bien sea dirigidos desde barcos o programados para bucear de forma autónoma, pueden cubrir rápidamente amplias regiones capturando imágenes digitales de precisión milimétrica; y no hablamos de unos pocos metros cuadrados, sino de extensiones de kilómetros cuadrados. En un futuro, los exploradores podrán operar en estaciones robóticas submarinas enteras que no requieran ni barcos ni tripulación que eleven los costes. En sus mayores sueños, Foley, del Woods Hole, se imagina cartografiando el fondo del mar Mediterráneo por completo y catalogando miles de naufragios que podrían ampliar nuestro conocimiento sobre diversas culturas a través de los tiempos.

En un congreso sobre arqueología marina celebrado en otoño de 2014, Royal también señaló que el conjunto actual de nuevas técnicas facilita y abarata la exploración: con unos pocos miles de dólares, los científicos pueden visitar los yacimientos y regresar con imágenes tridimensionales de objetos fascinantes. Y, dada la escasez de fondos, es la vía que la arqueología submarina debe seguir.

Congelada en el tiempo sobre el fondo del mar, la historia entera de la navegación se ha vuelto accesible. Tal y como Foley me comentó en la remota Anticitera antes de regresar, «por primera vez, el 98 por ciento de las profundidades del océano está a nuestro alcance».

PARA SABER MÁS

Decoding the heavens: A 2000-year-old computer—and the century-long search to discover its secrets. Jo Marchant. Da Capo Press, 2009.

Página web sobre la expedición «Regreso a Anticitera» con vídeos y fotografías: **http://antikythera.whoi.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

El mecanismo de Anticitera. Tony Freeth en *IyC*, febrero de 2010.

Vehículos autónomos bajo el agua. Pedro J. Sanz Valero, Pere Ridao y Gabriel Oliver en *IyC*, julio de 2012.



David Carpentier trabaja en el laboratorio de física de la Escuela Normal Superior de Lyon. Sus investigaciones se centran en el transporte ondulatorio de los electrones y en las fases topológicas de la materia.

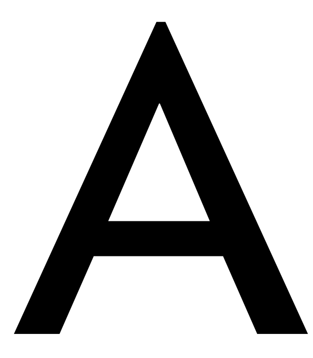
Laurent Lévy es físico del estado sólido en la Universidad de Grenoble y miembro del Instituto Néel de física de la materia condensada, en la misma ciudad.

MATERIA CONDENSADA

Aislantes topológicos

Un nuevo tipo de materiales presentan la peculiaridad de tener un interior aislante y una superficie conductora. Su descubrimiento ha cambiado la manera de entender las fases de la materia

David Carpentier y Laurent Lévy



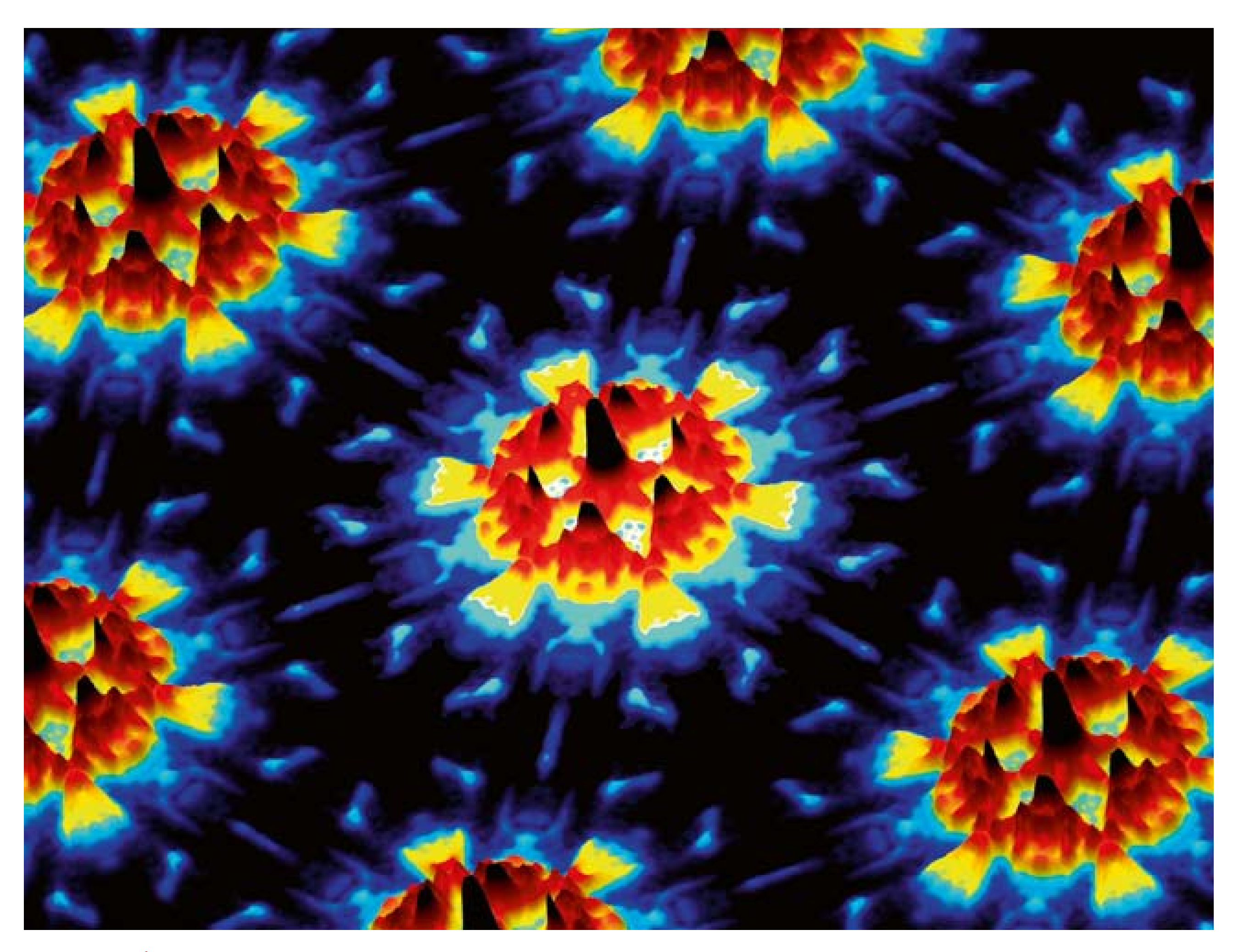
A LO LARGO DE LOS SIGLOS, LOS MATEMÁTICOS HAN DESCUBIERTO TODO TIPO DE estructuras geométricas y algebraicas que en un principio no auguraban aplicación práctica alguna. Con el tiempo, sin embargo, muchas de ellas han acabado manifestándose en las leyes físicas. A modo de ejemplo, baste mencionar el espacio de Minkowski (un espacio pseudoeuclídeo de cuatro dimensiones básico para entender la teoría de la relatividad) o los grupos de simetría, relevantes en el estudio de los cristales.

EN SÍNTESIS

Un nuevo tipo de materiales, los aislantes topológicos, se caracterizan por ser aislantes en el interior y conductores en la superficie. Dicha característica tiene un origen muy poco común: las propiedades topológicas de la función de onda cuántica de los electrones.

Aunque conductora, la superficie de estos materiales resulta completamente distinta de los metales conocidos. Sus electrones obedecen una dinámica formalmente análoga a la de las partículas relativistas y su espín queda determinado por su sentido de propagación.

Predichos teóricamente hace unos diez años, los primeros materiales de este tipo ya han llegado al laboratorio. Sus inusuales propiedades prometen aplicaciones en computación cuántica y espintrónica, un nuevo tipo de electrónica basada en el espín del electrón.



ONDAS CUÁNTICAS EN 2D: Los aislantes topológicos no conducen la electricidad en el interior, pero sí en la superficie. Esta imagen computarizada muestra el patrón de interferencia de los estados electrónicos de superficie en una aleación de bismuto. Las propiedades topológicas de la función de onda cuántica garantizan que, en la superficie de estos materiales, el espín del electrón queda fijado por su dirección de movimiento.

R. ROUSHAN Y A. YAZDANI/UNIVERSIDAD DE PRINCETON

Algunos objetos familiares, como los nudos y las superficies, han sido estudiados y clasificados por la topología. Esta rama de las matemáticas se centra en aquellas propiedades de los objetos que permanecen invariantes cuando los deformamos. Uno de los trabajos pioneros en este campo se debe al matemático suizo Leonhard Euler, quien en 1736 demostró la imposibilidad de cruzar los siete puentes de la ciudad de Königsberg pasando una sola vez por cada uno de ellos. La solución de este problema no depende de la longitud de los puentes ni de los detalles del camino, sino únicamente de las restricciones que impone tener que cruzarlos una sola vez.

Hace diez años, nadie hubiera adivinado que el carácter aislante o conductor de la materia pudiese guardar relación con las propiedades topológicas de las superficies cerradas. En 2005, sin embargo, varios trabajos pioneros demostraron que ciertos sólidos poseen un orden topológico oculto, y que algunos materiales pueden ser aislantes en el interior y conductores en la superficie. Conocidos con el nombre de aislantes topológicos, las propiedades únicas de estos materiales prometen interesantes aplicaciones en espintrónica, una versión de la electrónica basada en el espín del electrón. Al mismo tiempo, podrían constituir la base de los futuros ordenadores cuánticos.

Pero, además, su hallazgo ha cuestionado uno de los principios fundamentales de la física de la materia condensada: la relación entre orden y simetría. La clasificación moderna de los posibles estados de la materia se basa en la simetría. En un líquido, por ejemplo, las moléculas se distribuyen de manera aleatoria. Si las desplazamos una distancia arbitraria, obtendremos una configuración que también se corresponde con la de un líquido. Por ello, decimos que dicho estado es invariante bajo traslaciones espaciales. No ocurre lo mismo en un sólido cristalino, cuyos átomos se encuentran colocados en los nodos de un retículo periódico. Dicha configuración no se muestra invariante bajo traslaciones arbitrarias, sino solo bajo aquellas que desplazan cada átomo hasta otro nodo de la red. Es decir, el conjunto de traslaciones que dejan invariante la estructura atómica de un cristal resulta menos numeroso que en el caso de un líquido. Al pasar del estado líquido al sólido, la materia se ordena y su simetría disminuye.

La idea general de clasificar los estados de la materia en función de simetrías cada vez más restringidas se ha empleado desde hace tiempo. Y es precisamente este principio el que se ha venido abajo con el descubrimiento de los aislantes topológicos, ya que el orden que los caracteriza no puede describirse

en términos de una reducción de simetría. Con independencia de sus aplicaciones prácticas, estos materiales han propiciado un nuevo campo conceptual que abre las puertas a extender la clasificación tradicional de los estados de la materia condensada.

AISLANTES Y CONDUCTORES

Un aislante es un sólido que no conduce la electricidad: si aplicamos una pequeña diferencia de potencial entre sus extremos, no veremos circular ninguna corriente eléctrica. Por el contrario, en un metal mediremos una corriente proporcional al voltaje aplicado. ¿A qué se debe esta diferencia de comportamiento? Al fin y al cabo, un cristal se encuentra formado por una agrupación periódica de átomos, tanto si se trata de un aislante como si es un conductor.

Para responder a dicha pregunta, debemos considerar la manera en que se distribuyen los electrones en el interior de un cristal. Según la mecánica cuántica, un electrón no debe considerarse una partícula puntual, sino una onda que se propaga por el interior del sólido. Dicha onda queda descrita por una función compleja $\psi(r)$, donde r representa la posición dentro del cristal. Esta función de onda asigna a cada punto del espacio un módulo y una fase (las dos cantidades que definen un número complejo).

En física clásica, la trayectoria de una partícula no solo depende de su posición, sino también de su momento. De manera análoga, la función de onda cuántica de un electrón queda parametrizada por su momento, k, por lo que se denota mediante $\psi_k(r)$. Para un electrón que se propaga en el vacío, el momento puede tomar cualquier valor. En el interior de un cristal, sin embargo, la estructura periódica de la red limita los valores posibles del momento. Ello se debe a que la función de onda ha de reflejar las simetrías del cristal: si efectuamos un desplazamiento dado por un vector R que une dos átomos de la red, el resultado será indistinguible de la red original. En consecuencia, la función de onda desplazada, $\psi_k(r+R)$, deberá identificarse con la de partida, $\psi_k(r)$. Esta propiedad implica que el momento k del electrón solo puede tomar valores dentro de una región finita, denominada zona de Brillouin. Dicha región resulta tener un tamaño del orden de $2\pi/a$ en cada dirección, donde a denota la distancia típica entre dos nodos de la red. (Nótese que la zona de Brillouin no corresponde a ninguna región física del interior del cristal, sino que hace referencia a un espacio abstracto, el «espacio de momentos», definido por los distintos valores del momento del electrón.)

Una de las propiedades fundamentales de la zona de Brillouin es que sus bordes opuestos deben identificarse dos a dos, ya que ambos describen el mismo estado electrónico. La figura geométrica que se obtiene al «pegar» dichos bordes recibe el nombre de toro de Brillouin (*véase el recuadro* «Zona de Brillouin y bandas de energía»).

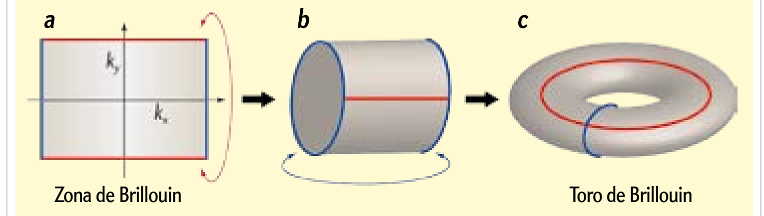
La estructura periódica de un cristal también determina las interferencias de las ondas asociadas a los electrones. En óptica, la interferencia de las ondas luminosas se produce cuando la luz puede tomar varios caminos entre la fuente y el punto de observación. Cuando eso ocurre, en la zona de llegada de la luz se observan franjas de interferencia, las cuales quedan especificadas por la longitud relativa de los distintos caminos. En un sólido, la geometría del retículo provoca que las ondas electrónicas interfieran de manera constructiva o destructiva. La consecuencia práctica de dichas interferencias es que, para cada momento k del electrón, su ener-

ESTADOS ELECTRÓNICOS

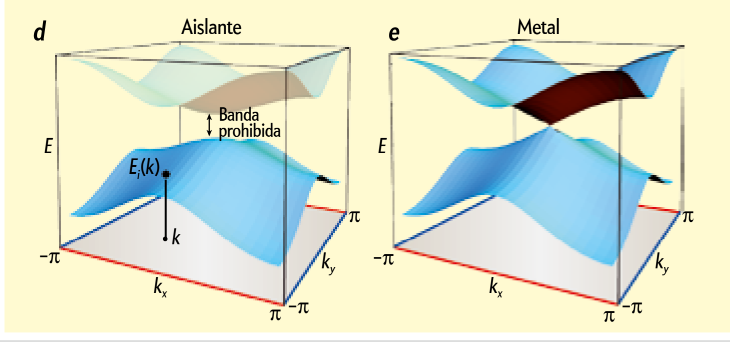
Zona de Brillouin y bandas de energía

En un sólido cristalino, la estructura periódica de la red limita los valores que pueden tomar el momento k y la energía E de los electrones. Esa distribución de momentos y energías determina el carácter aislante o conductor de un material.

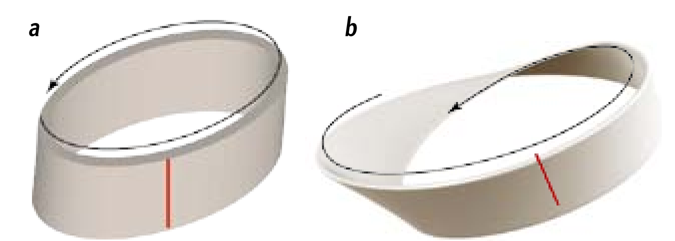
Para facilitar su representación gráfica, a continuación consideraremos el caso de un cristal bidimensional. El conjunto de valores que puede tomar cada una de las dos componentes del momento del electrón (k_x y k_y) configura una región en el espacio de momentos conocida como «zona de Brillouin» (*a*). Los extremos opuestos de una celda de Brillouin (*rojo y azul*) representan el mismo estado electrónico, por lo que deben identificarse dos a dos (*a y b*). La topología de la zona de Brillouin es, por tanto, la de un toro, una superficie cerrada que puede rodearse en dos direcciones distintas (*c*). Las propiedades topológicas de un material quedan determinadas por la manera en que se comporta la función de onda cuántica al recorrer el toro de Brillouin.



Para cada valor posible del momento (para cada punto del toro de Brillouin), la energía del electrón solo puede tomar ciertos valores: $E_1(k)$, $E_2(k)$, etcétera. El conjunto de energías $E_i(k)$ que se obtiene al considerar todos los valores posibles del momento k define la «banda de energía» E_i (*superficies azules*). Los electrones de un sólido van ocupando estas bandas en orden de energía creciente. De esta manera, las bandas de menor energía se encuentran llenas y las de energía superior, vacías. En un aislante (*d*), las bandas llenas están separadas de las vacías por un intervalo de energías prohibidas (*gap*). En un conductor (*e*) las bandas electrónicas están conectadas. Ello permite que los electrones puedan pasar con facilidad de una banda llena a otra vacía y, de esta manera, conducir la electricidad.



POUR LA SCIENCE



DIFERENCIAS GLOBALES: Las propiedades topológicas de un objeto no dependen de sus detalles locales, sino de su estructura global. Esta figura muestra una cinta normal (*a*) y una banda de Möbius (*b*). Sus secciones locales (*rojo*) resultan indistinguibles. Sin embargo, al dar una vuelta completa a cada una de las bandas, en un caso regresaremos al punto de partida y en el otro no. Esta propiedad es topológica, ya que no depende de los detalles particulares de la cinta, como su anchura o su longitud. De hecho, una cinta normal no puede convertirse en una de Möbius mediante transformaciones continuas.

gía solo puede tomar determinados valores: $E_1(k)$, $E_2(k)$, etcétera. El conjunto de valores $E_i(k)$ para todos los momentos k del toro de Brillouin define la «banda de energía» E_i.

Dependiendo de la naturaleza del cristal, las distintas bandas de energía se solaparán o quedarán separadas por un intervalo de energías prohibidas (*gap*). Esta estructura de bandas es la que determina las propiedades aislantes o conductoras de un material. En un aislante, la banda de menor energía se encuentra repleta de electrones; la siguiente banda energética está vacía; y una y otra quedan separadas por un intervalo de energías prohibidas. Si entre los extremos del sólido aplicamos un voltaje inferior al que corresponde a la banda prohibida, la energía electrostática no podrá transmitirse a los electrones y no circulará ninguna corriente. En un conductor, en cambio, las bandas de energía se tocan, por lo que incluso un pequeño voltaje bastará para comunicar energía a los electrones de la banda inferior y promocionarlos a la siguiente, lo que permitirá el paso de la corriente eléctrica.

UN ORDEN TOPOLÓGICO OCULTO

Así pues, un aislante es un sólido en el que algunas bandas de energía se encuentran repletas de electrones mientras otras se hallan vacías. Una vez conocida la estructura de bandas y la anchura de la banda prohibida, resulta interesante analizar las simetrías que exhiben las funciones de onda de las bandas llenas. Como veremos, en ellas puede esconderse un orden topológico insospechado.

Por simplicidad, supongamos que nuestro aislante solo posee una banda energética llena, $E_1(k)$. En ella, cada valor del momento k perteneciente al toro de Brillouin describe un estado electrónico, por lo que tiene asociada una función de onda correspondiente, $\psi_k(r)$. Consideremos ahora el objeto matemático formado por todas las funciones de onda asociadas a la banda E_1 (una por cada punto k del toro de Brillouin) y preguntémonos cómo cambian dichas funciones a medida que el momento k recorre todo el toro. Al dar una vuelta completa al toro de Brillouin y volver al punto de partida, ¿hallaremos la misma función de onda?

Como mencionábamos más arriba, toda función de onda viene dada por un módulo y una fase. Las sorpresas llegan al analizar el comportamiento de esta última. Tomemos un punto cualquiera k_0 del toro de Brillouin y consideremos la función de onda $\psi_{k_0}(r)$. A medida que recorramos el toro, la función de onda variará de forma continua. Sin embargo, al dar una vuelta completa y regresar al punto k_0, las reglas de la mecánica dictan que la función de onda resultante no tiene por qué ser idéntica a la de partida: ambas han de tener el mismo módulo, pero pueden diferir en una fase.

En general, las propiedades topológicas de un objeto se encuentran relacionadas con sus aspectos globales; es decir, no pueden distinguirse atendiendo únicamente a su comportamiento local. En nuestro caso, la variación de fase que puede experimentar la función de onda al dar una vuelta al toro de Brillouin es topológica, ya que no depende del punto en que hayamos iniciado nuestro recorrido, k_0, ni del camino concreto que hayamos escogido para rodear el toro. Solo aparece al considerar las propiedades globales de este objeto y el conjunto de todas las funciones de onda definidas sobre él.

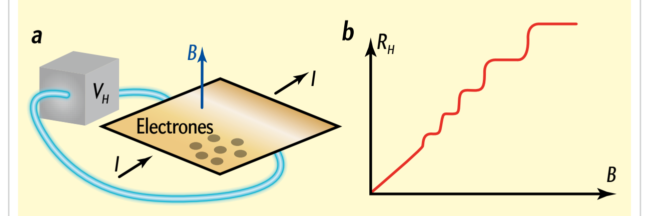
Dicha variación de fase es cero en casi todos los aislantes conocidos. En 1982, sin embargo, se descubrió que había un estado de la materia en el que no ocurría así. Dicho estado aparece durante el efecto Hall cuántico, un fenómeno que tiene lugar cuando un conjunto de electrones confinados a moverse en un plano se ven sometidos a un campo magnético externo muy intenso. El análisis de este estado de la materia puso de relieve la importancia de las propiedades topológicas y obligó a introducir una nueva noción de orden en materia condensada: el orden topológico. Este no se encuentra asociado a ninguna simetría, sino que caracteriza los estados de la materia según las propiedades topológicas de las funciones de onda electrónicas.

ORDEN TOPOLÓGICO

Efecto Hall cuántico

El primer estado topológico de la materia fue identificado al estudiar el efecto Hall cuántico. La versión clásica de este fenómeno tiene lugar cuando se hace pasar una corriente eléctrica *I* a través de una placa conductora en presencia de un campo magnético *B* perpendicular a ella (*a*). En tal caso, aparece una diferencia de potencial V_H perpendicular a la corriente aplicada. El cociente entre dicho voltaje y la intensidad de la corriente recibe el nombre de resistencia de Hall, $R_H = V_H/I$.

En 1980, Klaus von Klitzing observó que, a bajas temperaturas, los valores de la resistencia de Hall se encontraban cuantizados (*b*). Este efecto se debe a la aparición de niveles de energía discretos; es decir, separados por una «banda prohibida», tal y como ocurre en un aislante. En 1982, David Thouless, de la Universidad de Washington en Seattle, y sus colaboradores demostraron que los niveles de energía llenos del estado de Hall presentan un orden topológico relacionado con la fase cuántica de los electrones. La topología no trivial del efecto Hall se manifiesta en que los cuantos de resistencia solo dependen de constantes fundamentales de la naturaleza.



POUR LA SCIENCE

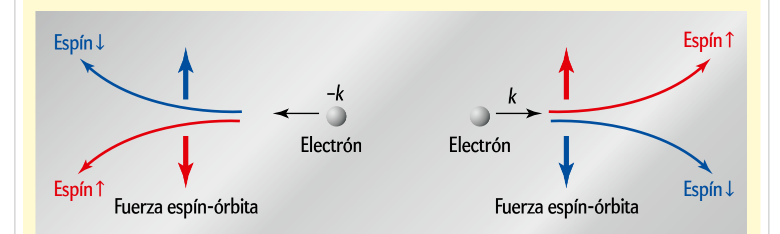
Durante más de dos décadas, el concepto de orden topológico quedó restringido al efecto Hall cuántico: un fenómeno exótico e interesante, pero asociado a unas condiciones físicas muy particulares. Esa visión saltó por los aires con el trabajo de Charles Kane y Eugene Mele, investigadores de la Universidad de Pensilvania. En 2005, estos dos físicos mostraron que un orden topológico también podía aparecer en algunos sólidos en su estado natural, sin necesidad de ningún campo magnético externo.

ESPÍN Y MOMENTO LINEAL

Interacción espín-órbita

El origen físico de las fases topológicas de un sólido se encuentra en la interacción espín-órbita, un efecto relativista por el que el espín del electrón puede influir en el movimiento de la partícula. En el caso de un electrón que orbita en torno a un núcleo, dicho efecto puede entenderse como debido al campo magnético que, en el sistema de referencia de reposo del electrón, genera el núcleo atómico al «girar» en torno al electrón.

La interacción espín-órbita suele desempeñar un papel secundario en física de la materia condensada. Sin embargo, sus consecuencias se hacen palpables en algunos materiales compuestos por átomos pesados. Ello se debe a que, cerca de un núcleo con un número atómico elevado, los electrones alcanzan velocidades relativistas, lo que aumenta la intensidad de la interacción espín-orbita.



La fuerza debida a la interacción espín-órbita actúa de forma análoga a un campo magnético. Para un electrón que avanza con momento k, la interacción desviará la partícula en un sentido o en el opuesto dependiendo de cuál sea su estado de espín (↑ o ↓). De igual modo, un electrón con espín dado se verá desviado en un sentido u otro según su momento sea k o $-k$.

LA IMPORTANCIA DEL ESPÍN

Volvamos a los posibles estados electrónicos del toro de Brillouin. Hasta ahora, hemos pasado por alto una propiedad clave del electrón: su espín. El espín corresponde a una propiedad intrínseca de la partícula, como su carga o su masa. Constituye el análogo cuántico de un pequeño momento angular, y puede representarse mediante un vector S que apunte en una dirección arbitraria. A dicho vector se le asocian dos estados de espín, los cuales denotaremos por ↑ y ↓ según el espín apunte en el mismo sentido que S o en el opuesto. Este atributo cuántico del electrón implica que, en cada punto del toro de Brillouin, podemos tener no uno, sino dos estados electrónicos y, por tanto, dos funciones de onda: $\psi_{k\uparrow}(r)$ y $\psi_{k\downarrow}(r)$.

El trabajo de Kane y Mele consideraba cierto efecto dependiente del espín del electrón: la interacción espín-órbita. De origen relativista, esta surge debido a que, bajo ciertas circunstancias, el estado de espín puede influir sobre el movimiento del electrón. Los investigadores estudiaron qué restricciones imponía la interacción espín-orbita sobre la topología de las bandas electrónicas. En concreto, se interesaron por una de las propiedades fundamentales de dicha interacción: su invariancia bajo inversión temporal.

En general, una transformación de inversión temporal consiste en invertir las velocidades de las partículas (o, de manera equivalente, sus momentos) sin alterar sus posiciones. Al efectuar una transformación de este tipo, el espín del electrón también cambia. Consideremos la función de onda $\psi_{k\uparrow}(r)$ y llamemos $T\psi_{k\uparrow}(r)$ al resultado de aplicar sobre ella una transformación de inversión temporal. Sabemos que $T\psi_{k\uparrow}(r)$ debe describir un electrón con momento $-k$ y estado de espín ↓, por lo que cabría pensar que la función de onda transformada ha de ser $\psi_{-k\downarrow}(r)$. Pero, una vez más, las leyes cuánticas nos dicen que $T\psi_{k\uparrow}(r)$ y $\psi_{-k\downarrow}(r)$ no tienen por qué ser idénticas, sino que una y otra pueden diferir en una fase. ¿Reviste importancia dicha fase? En otras palabras, ¿podemos escogerla de tal modo que sea siempre nula?

Una vez más, la respuesta depende de las propiedades topológicas del conjunto de funciones de onda definidas sobre el toro de Brillouin. Al estudiar el comportamiento de esta fase tras dar una vuelta completa al toro, Kane y Mele identificaron una nueva propiedad topológica, distinta de la que aparece en el efecto Hall cuántico. Dicha propiedad caracteriza un orden inusual y, por tanto, un nuevo estado de la materia: el de aislante topológico.

El primer estado de aislante topológico predicho tenía lugar en dos dimensiones espaciales: se trataba de una propiedad de los electrones restringidos a moverse en un plano y sometidos a una fuerte interacción espín-órbita. Por sus similitudes con el efecto Hall cuántico, dicho estado fue denominado «efecto Hall cuántico de espín». En 2006, sin embargo, tres grupos teóricos independientes demostraron de forma simultánea que el efecto Hall cuántico de espín podía generalizarse a materiales tridimensionales. Es decir, que el mismo orden topológico podía existir de forma natural en un cristal. Aquel hallazgo disparó la búsqueda de materiales topológicos.

Una vez más, el tipo de orden que caracteriza a los aislantes topológicos no puede deducirse a partir de las propiedades locales de las funciones de onda. Ello garantiza la robustez de dichos materiales: al igual que una banda de Möbius no puede deformarse poco a poco hasta convertirla en una banda normal, las funciones de onda de un aislante topológico no pueden transformarse de manera continua en las de un aislante común. Ello implica que numerosas propiedades de estos materiales son insensibles ante pequeñas perturbaciones.

ESTADOS DE SUPERFICIE

Por exóticos que puedan resultar, los aislantes topológicos no habrían tenido tanto impacto si no fuese por una propiedad sorprendente: la existencia de estados metálicos, o conductores, en su superficie. Para entender la relación entre estos estados de superficie y el orden topológico, consideremos qué ocurre al tomar una porción de aislante topológico y rodearla de un aislante normal, como el aire. ¿Cómo describir la interfase entre ambos materiales?

Al cruzar la frontera que separa uno de otro, las bandas de energía y las funciones de onda del aislante ordinario dan paso

Continúa en la página 82

POUR LA SCIENCE

La búsqueda de partículas de Majorana

La variante superconductora de los aislantes topológicos podría confirmar la existencia de un estado cuántico exótico propuesto hace 80 años en el contexto de las partículas elementales

RAMÓN AGUADO

En 1937, el físico italiano Ettore Majorana demostró que las reglas de la mecánica cuántica relativista permitían la existencia de fermiones neutros idénticos a sus propias antipartículas. Esa posibilidad contrasta en gran medida con lo que observamos en la naturaleza: el electrón y el positrón, así como otros pares partícula-antipartícula conocidos, no corresponden al mismo estado cuántico. Ya en su artículo, Majorana postuló que el neutrino tal vez fuese uno de esos fermiones exóticos. Y aunque hace años que un gran número de experimentos en todo el mundo intentan zanjar la cuestión de si los neutrinos son idénticos a los antineutrinos, hoy por hoy la pregunta continúa abierta.

Sin embargo, en los últimos años hemos aprendido que la idea de Majorana no se restringe a la física de altas energías: puede trasladarse a la materia condensada. Para ello, basta con sustituir el concepto de «partícula elemental» por el de «cuasipartícula».

Todo sistema de materia condensada se encuentra formado por un gran número de partículas que interaccionan entre sí. Ello hace que, en la práctica, resulte imposible resolver por completo todos sus detalles microscópicos. Por fortuna, en numerosos casos resulta posible formular un modelo que incorpora las principales características del sistema y deja de lado la información irrelevante. Dichos modelos se basan en la idea de partícula efectiva, o cuasipartícula. Estas emergen como excitaciones del estado cuántico colectivo que describe el sistema.

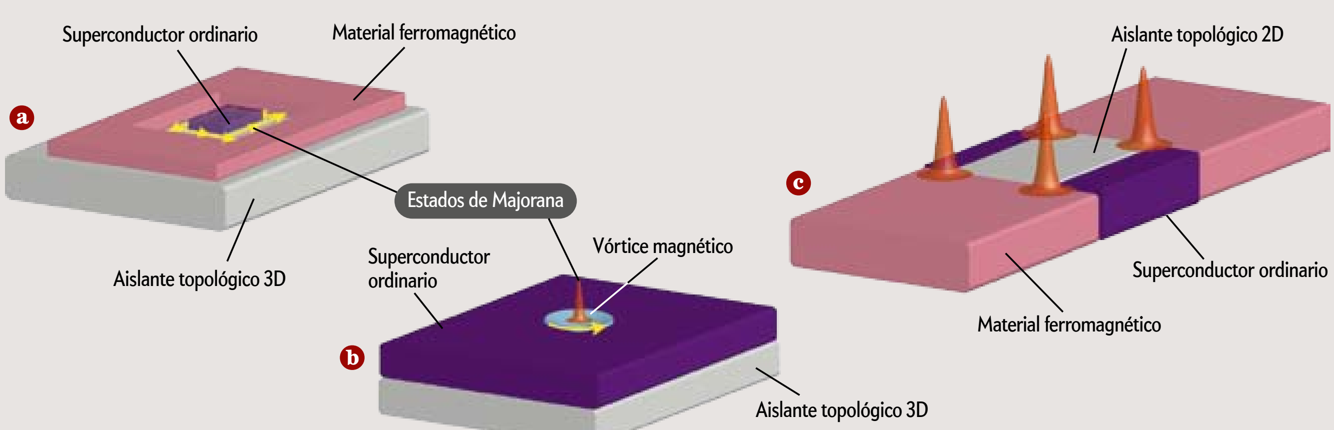
Las cuasipartículas tienen un profundo significado físico. La manera más sencilla de entenderlo es pensar que un mismo sistema puede comportarse de manera muy diferente según la escala de energías a la que lo analicemos. En este sentido, una cuasipartícula deja de ser una mera construcción teórica y adquiere la misma entidad fundamental que una partícula: basta con sondear experimentalmente al sistema a la escala de energía apropiada.

En un metal, por ejemplo, las cuasipartículas se corresponden con las excitaciones sobre el estado colectivo de menor energía posible. Este último se obtiene cuando todos los estados electrónicos se encuentran llenos hasta cierto nivel, dado por la densidad de electrones. Cada una de las excitaciones sobre dicho estado fundamental deja tras de sí un estado vacío, o «hueco», el cual puede interpretarse como un electrón de carga positiva. En este contexto, el equivalente a cambiar una partícula por su antipartícula no sería más que intercambiar cuasipartículas de tipo electrón por cuasipartículas de tipo hueco.

Sin embargo, hay dos razones que impiden que un metal albergue partículas idénticas a su antipartícula. La primera se debe a que electrones y huecos no poseen necesariamente la misma masa efectiva. La segunda no es otra que aquella por la que el electrón y el positrón no son fermiones de Majorana: en un metal, un electrón y un hueco tienen cargas opuestas. ¿Cómo generar entonces cuasipartículas de Majorana en un sistema de materia condensada? La respuesta la encontramos en los superconductores.

Ni fermiones ni bosones

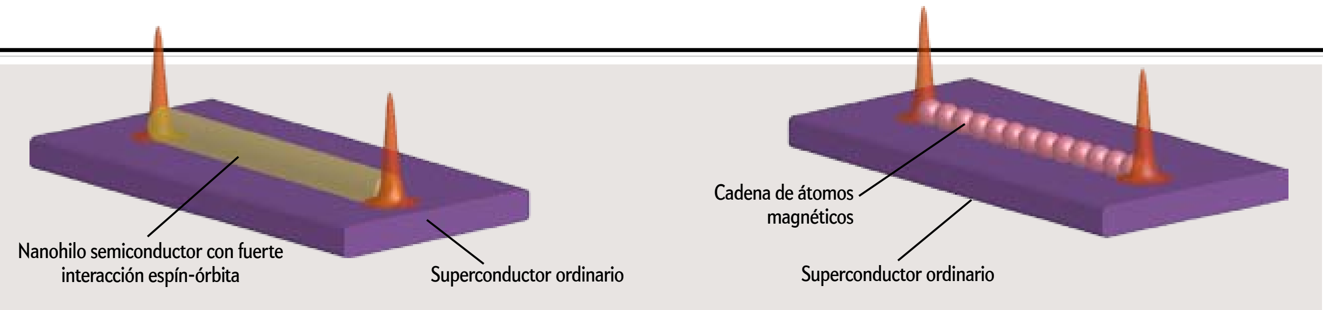
Cuando un material se torna superconductor, sus electrones se agrupan en pares, llamados pares de Cooper, los cuales «condensan» y forman una onda cuántica colectiva. Romper un par de Cooper equivale a generar dos excitaciones simétricas y de ener-



DISEÑO DE SUPERCONDUCTORES TOPOLÓGICOS I (propuesta original de Liang Fu y Charles Kane)

a En presencia de un superconductor ordinario (*violeta*), la superficie de un aislante topológico tridimensional (*gris*) se convierte en un superconductor topológico en dos dimensiones. En la frontera con un material que rompa la invariancia bajo inversión temporal, como un material ferromagnético (*rosa*), surgen estados de borde unidireccionales de tipo Majorana (*flechas amarillas*). Dichos estados constituyen el análogo superconductor de los estados de borde del efecto Hall cuántico. **b** Otra manera de romper la simetría bajo inversión temporal consiste en inducir vórtices (*azul*) mediante un campo magnético externo. Cada vórtice lleva asociado un cuanto de flujo magnético y alberga una excitación de energía cero correspondiente a una partícula de Majorana de tipo anyón (*función de onda naranja*). **c** De igual modo, la frontera entre un aislante topológico bidimensional y un superconductor da lugar a un superconductor topológico en una dimensión. En las fronteras con un material ferromagnético aparecen cuasipartículas de Majorana (*naranja*).

ILUSTRACIONES CORTESÍA DE RAMÓN AGUADO



DISEÑO DE SUPERCONDUCTORES TOPOLÓGICOS II

Las propuestas de mayor éxito experimental hasta la fecha han sido las basadas en depositar nanohilos semiconductores con una fuerte interacción espín-órbita (*amarillo, izquierda*) o cadenas de átomos magnéticos (*rosa, derecha*) sobre un superconductor (*violeta*). En ambos casos se forma un superconductor topológico unidimensional con partículas de Majorana (*naranja*) localizadas en los extremos. Estos sistemas constituyen una realización experimental de los superconductores topológicos unidimensionales propuestos en el año 2000 por Alexei Kitaev.

gía opuesta. Dichas excitaciones, denominadas cuasipartículas de Bogoliubov, corresponden a una superposición cuántica de electrones y huecos.

En un superconductor la simetría entre electrones y huecos está garantizada, por lo que las cuasipartículas de Bogoliubov sí pueden considerarse pares partícula-antipartícula. No obstante, el requisito de neutralidad de carga no se cumple, ya que cada excitación es eminentemente de tipo electrón o de tipo hueco. La única posibilidad de generar una cuasipartícula de Bogoliubov neutra es hacerlo a coste energético cero. Dichas excitaciones de energía cero, mitad electrón y mitad hueco, sí pueden considerarse partículas de Majorana en un sentido preciso. Los superconductores que las contienen son el equivalente superconductor de los aislantes topológicos: los superconductores topológicos.

Un aislante topológico se caracteriza por presentar una banda prohibida en el interior y estados metálicos en la superficie. De manera análoga, un superconductor topológico posee estados superconductores en el interior (debidos igualmente a la existencia de una banda prohibida «superconductora») y excitaciones de Majorana en la frontera. Estas últimas constituyen el equivalente a los estados metálicos que aparecen en el borde de los aislantes topológicos.

Cabe señalar que, a diferencia de las partículas que Majorana predijo en 1937, las que aparecen en los superconductores topológicos no son fermiones, sino *anyones*: un tipo de estado cuya función de onda no se comporta como la de un bosón ni como la de un fermión. Al intercambiar dos anyones idénticos, la función de onda conjunta adquiere una fase topológica no conmutativa; es decir, una que depende del orden en que efectuemos los intercambios. (Este comportamiento contrasta por completo con el de bosones y fermiones: el intercambio de bosones no altera la función de onda, mientras que el de fermiones simplemente añade un cambio de signo.)

Las fases superconductoras topológicas con excitaciones de tipo Majorana fueron predichas en el año 2000 por Alexei Kitaev, del Instituto de Tecnología de California, a partir de un modelo exótico de superconductividad en una dimensión. Hasta hace poco pensábamos que sería prácticamente imposible que un tipo de superconductividad como la predicha por Kitaev existiese en la naturaleza. Sin embargo, en los últimos años hemos aprendido a diseñar superconductores topológicos a partir de materiales ya conocidos. La idea básica, propuesta en el año 2008 por Liang Fu y Charles Kane, de la Universidad de Pensilvania, consiste en inducir la superconductividad en aislantes topológicos. Poco después aparecieron propuestas similares, basadas en sustituir los aislantes topológicos por semiconductores con un fuerte acoplamiento espín-órbita.

Primeros éxitos

Estos avances han convertido la búsqueda de partículas de Majorana en uno de los temas más candentes en materia condensada de los últimos años. De hecho, parece que los grandes detectores de neutrinos han perdido la carrera contra laboratorios mucho más modestos: en 2012, el grupo de Leo Kouwenhoven, de la Universidad de Tecnología de Delft, obtuvo indicios experimentales compatibles con la existencia de partículas de Majorana en nanohilos semiconductores acoplados a un superconductor. En los últimos tres años, otros grupos han llevado a acabo experimentos similares; por ejemplo, con cadenas de átomos de hierro depositados sobre una superficie superconductora de plomo.

Aunque los primeros indicios invitan al optimismo, aún necesitamos una confirmación definitiva de la existencia de estos estados en materia condensada. En nuestro grupo del Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC, en Madrid, investigamos de manera teórica este tipo de sistemas a fin de descartar explicaciones alternativas y con el objetivo de proponer nuevas técnicas que corroboren la existencia de partículas de Majorana. Entre ellas, estamos explorando la manera en que la presencia de estas partículas afecta a las supercorrientes (corrientes eléctricas en ausencia de voltaje) en uniones de superconductores topológicos, así como la posibilidad de extender las condiciones bajo las que pueden aparecer las excitaciones de energía cero en un superconductor.

Más importante aún es demostrar que dichas excitaciones presentan una estadística cuántica no conmutativa. Un hallazgo de este tipo se situaría en la frontera del conocimiento, ya que semejante fenómeno carece de análogo en el modelo estándar de la física de partículas (todas las partículas elementales conocidas son o bien bosones, o bien fermiones). Además, esta propiedad daría lugar a técnicas de computación cuántica casi inimaginables hoy.

Los mejores laboratorios del mundo compiten en estos momentos por ser los primeros en confirmar experimentalmente la existencia de estas esquivas partículas en superconductores topológicos. De lograrse este objetivo, no sería exagerado afirmar que las partículas de Majorana de la materia condensada resultan aún más interesantes que sus homólogas en física de altas energías.

Ramón Aguado *es investigador en el Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC, en Madrid.*

Viene de la página 79
a las del aislante topológico. Al tratarse de dos aislantes, sus bandas de energía llenas y vacías se encontrarán separadas por una banda prohibida. En principio, podríamos pensar que las bandas llenas del aislante ordinario se deforman hasta convertirse en las bandas llenas del aislante topológico. Sin embargo, sabemos que eso es imposible, ya que estas últimas exhiben una propiedad topológica robusta, que no puede obtenerse mediante ninguna deformación continua de las bandas llenas de un aislante ordinario.

En realidad, lo que sucede en la frontera es que una de las bandas llenas del aislante topológico se convierte en una banda vacía del aislante ordinario. Allí donde las bandas se cruzan, la banda prohibida desaparece. Eso implica que, en la superficie, el material deja de comportarse como un aislante y pasa a conducir la electricidad.

Varios trabajos teóricos han demostrado que las propiedades de estos estados conductores no guardan relación con las de ningún metal conocido. La interacción espín-órbita, responsable del orden topológico característico del interior del material, ejerce un efecto sorprendente sobre la interfase: de los dos posibles estados de espín asociados a cada momento k, solo sobrevive uno. Es decir, cada sentido de propagación de los electrones queda asociado a un único estado de espín. En el caso del efecto Hall cuántico de espín, que tiene lugar en dos dimensiones, la interfase de separación es unidimensional. En ella, los electrones con espín ↑ solo se propagan en sentido horario (por ejemplo), mientras que aquellos con espín ↓ lo hacen en sentido antihorario. Los aislantes topológicos en tres dimensiones se comportan de forma similar: cada par de momentos k y $-k$ queda asociado a dos estados de espín opuestos.

Una segunda propiedad de los estados de superficie es que su dinámica obedece leyes formalmente análogas a las de las partículas que se mueven a la velocidad de la luz. En otras palabras, la física de los electrones en la superficie de un aislante topológico puede calificarse de «relativista». Este comportamiento no es único, ya que también aparece en el grafeno, el material formado por láminas bidimensionales de carbono descubierto en 2004 [*véase* «Grafeno», por A. K. Geim y P. Kim; Investigación y Ciencia, junio de 2008 *y* «Electrónica del grafeno», por J. González Carmona, M. A. H. Vozmediano y F. Guinea; Investigación y Ciencia, septiembre de 2010]. La diferencia reside en que, en los aislantes topológicos, solo uno de los dos estados de espín se encuentra ocupado.

MATERIALES TOPOLÓGICOS

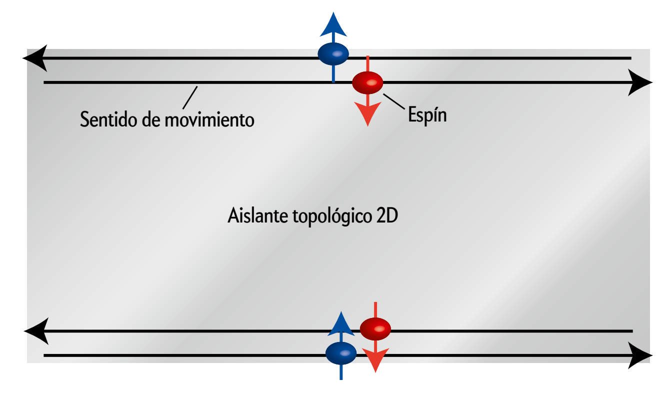
En la búsqueda de aislantes topológicos, el grupo de Shou-Cheng Zhang, de Stanford, identificó una propiedad clave. Como acabamos de ver, en la interfase de un aislante topológico y otro ordinario, la banda de energía llena de uno de los materiales se convierte en una banda vacía del otro. Así que podemos dar la vuelta al argumento: si dos materiales parecidos se diferencian en el intercambio de una banda de energía llena y otra vacía, uno de ellos habrá de ser un aislante topológico. La situación en la que dos bandas de energía se «inviertan» con respecto a su orden natural no resulta inusual en la física de materiales. Así pues, para encontrar aislantes topológicos, los investigadores se centraron en estudiar sólidos aislantes, compuestos por elementos pesados (ya que en ellos la interacción espín-órbita resulta más intensa) y dotados de una inversión de bandas.

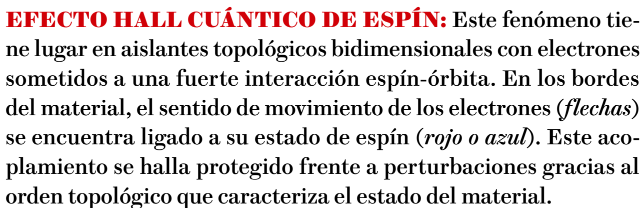
Zhang y de sus colaboradores hallaron una aleación prometedora: el telururo de mercurio (HgTe). Este material, conocido por sus propiedades optoelectrónicas infrarrojas, presenta también una inversión de bandas producida por la fuerte interacción espín-órbita debida al mercurio. Con el objetivo de obtener un aislante topológico, los investigadores propusieron insertar una fina capa de telururo de mercurio de una decena de nanómetros de espesor en una matriz de telururo de cadmio (CdTe). Poco después, el grupo de Laurens Molenkamp, de la Universidad de Wurzburgo, encontró indicios experimentales del efecto Hall cuántico de espín en las capas de telururo de mercurio.

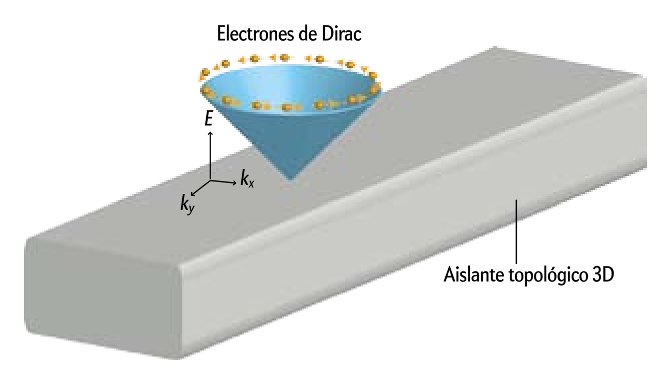
Para detectar el orden topológico, Molenkamp y sus colaboradores buscaron los estados metálicos en la superficie del material. Mientras que un aislante ordinario no permite ningún tipo de transporte eléctrico, en un aislante topológico este tiene lugar en la superficie. Eso se traduce en unas propiedades de conducción eléctrica particulares, gracias a las cuales fue posible realizar el descubrimiento experimental de esta fase de la materia. Poco después, el efecto Hall cuántico de espín fue detectado en capas de arseniuro de indio (InAs) insertadas en antimoniuro de galio (GaSb), una aleación de semiconductores con propiedades similares a las del telururo de mercurio.

A partir de 2006, la búsqueda de materiales tridimensionales dotados de un orden topológico se orientó hacia los semiconductores de bismuto, como $Bi_{1-x}Sb_x$, Bi_2Se_3 y Bi_2Te_3. Algunas aleaciones de bismuto son aislantes y presentan una inversión de bandas debido a la interacción espín-órbita. Como vimos más arriba, los estados de superficie de un aislante topológico tridimensional corresponden a electrones «relativistas» cuyo espín se

UNA FRONTERA SINGULAR: En la interfase que separa un aislante común (*izquierda*) de uno topológico (*derecha*), las respectivas bandas de energía llenas y vacías se cruzan. Eso implica que, en la frontera, la banda prohibida se anula y aparecen estados metálicos (conductores).




EFECTO HALL CUÁNTICO DE ESPÍN: Este fenómeno tiene lugar en aislantes topológicos bidimensionales con electrones sometidos a una fuerte interacción espín-órbita. En los bordes del material, el sentido de movimiento de los electrones (*flechas*) se encuentra ligado a su estado de espín (*rojo o azul*). Este acoplamiento se halla protegido frente a perturbaciones gracias al orden topológico que caracteriza el estado del material.



ELECTRONES «RELATIVISTAS»: En la superficie de un aislante topológico tridimensional, la energía de los electrones (*naranja*) satisface una relación del estilo $E \sim k$, donde k representa la magnitud del momento bidimensional ($E \sim \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$). Esa dependencia resulta análoga a la que obedecen las partículas relativistas que se mueven a la velocidad de luz. En el espacio de momentos, la relación $E \sim k$ define un «cono de Dirac» (*celeste*).

RAMÓN AGUADO

encuentra correlacionado con su momento lineal. Para identificarlos, un método pertinente es la fotoemisión resuelta en ángulo, consistente en extraer electrones de un material al bombardearlo con fotones de energía y ángulo de incidencia precisos. Al analizar los electrones emitidos, resulta posible distinguir los estados de superficie del material de los estados interiores, así como estudiar la dependencia de la energía con el momento. Si además se mide el espín de los electrones, ello permite caracterizar por completo los estados de superficie. Zahid Hasan, de la Universidad de Princeton, y su equipo descubrieron los primeros aislantes topológicos tridimensionales al detectar electrones relativistas en la superficie de muestras de Bi_2Se_3 y Bi_2Te_3.

UN FUTURO BRILLANTE

El hallazgo de nuevos aislantes topológicos abre la puerta a múltiples aplicaciones. El acoplamiento entre el espín y el momento del electrón que existe en la superficie de estos materiales implica que todos los electrones que se mueven en un sentido presentan el mismo estado de espín. Esta propiedad los convierte en candidatos naturales para la espintrónica, una electrónica no tradicional basada en el espín del electrón y hoy en pleno desarrollo [*véase* «La edad de diamante de la espintrónica», por D. D. Awschalon, R. Epstein y R. Hanson; Investigación y Ciencia, diciembre de 2007].

Como hemos visto, en los bordes del efecto Hall cuántico de espín circulan dos corrientes en sentidos opuestos, cada una con un espín bien definido. En principio, ello permite separar estas dos corrientes «polarizadas» en espín para escribir un bit de información en una memoria magnética. El interés de esta técnica se debe a la posibilidad de controlar las corrientes polarizadas sin tener que recurrir a materiales magnéticos, lo que acarrea varias dificultades. Y, al tratarse de materiales semiconductores (es decir, aislantes con una banda prohibida muy estrecha), podrían integrarse fácilmente en los dispositivos de silicio en los que se basa la electrónica actual.

Otras aplicaciones giran en torno a la computación cuántica y cierto tipo de estados conocidos como fermiones de Majorana. En 1937, el físico teórico italiano Ettore Majorana postuló la existencia de una nueva clase de partículas, las cuales serían idénticas a sus antipartículas. (En el contexto de la física de partículas elementales, los neutrinos podrían ser fermiones de Majorana, si bien hoy por hoy esta posibilidad sigue abierta.) Los fermiones de Majorana carecen de carga eléctrica e interaccionan muy débilmente con su entorno. Esta propiedad los hace especialmente interesantes para implementar bits cuánticos, o qubits. El problema principal a la hora de construir un ordenador cuántico reside en la inestabilidad de los qubits: para poder realizar cálculos, resulta imprescindible que un qubit cambie de estado solo de manera controlada; en particular, no debería hacerlo espontáneamente por efecto de la interacción con el entorno. Dado que los fermiones de Majorana interaccionan muy débilmente con el entorno, ello los convierte en estados de gran interés para la computación cuántica.

En 2008, Kane y Liang Fu, también de la Universidad de Pensilvania, demostraron que, al poner en contacto un aislante topológico con un superconductor, los nuevos estados de superficie incluían, precisamente, fermiones de Majorana. El estudio de estos estados y sus posibles aplicaciones constituye hoy un campo en plena efervescencia.

PARA SABER MÁS

Quantum spin Hall effect in graphene. Charles Kane y Eugene Mele en *Physical Review Letters*, vol. 95, art. 226801, noviembre de 2005. Disponible en **arxiv.org/abs/cond-mat/0411737**

An insulator with a twist. Charles Kane en *Nature Physics*, vol. 4, págs. 348-349, mayo de 2008.

Superconducting proximity effect and Majorana fermions at the surface of a topological insulator. Liang Fu y Charles Kane en *Physical Review Letters*, vol. 100, art. 096407, 2008. Disponible en **arxiv.org/abs/0707.1692**

The quantum spin Hall effect and topological insulators. Xiao-Liang Qi y Shou-Cheng Zhang en *Physics Today*, vol. 63, págs. 33-38, enero de 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/1001.1602**

Topological insulators. Charles Kane y Joel Moore en *Physics World*, vol. 24, págs. 32-36, febrero de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

El efecto Hall cuántico. Klaus von Klitzing en *IyC*, mayo de 1986.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Bordes e idealizaciones

¿Se corresponde el espacio euclídeo con nuestra representación mental del espacio físico?

Sabemos desde hace un siglo que la geometría del mundo en que vivimos no es euclídea. Sin embargo, el espacio euclídeo parece corresponderse bastante bien con nuestras nociones intuitivas del espacio físico. Con excepción de quienes han estudiado física cuántica y relatividad general, las personas solemos pensar en los objetos físicos como en sólidos que «viven» en un espacio euclídeo de tres dimensiones. No obstante, si analizamos la relación entre la formulación matemática del espacio euclídeo y nuestra concepción intuitiva de los objetos sólidos, encontramos algunas discrepancias.

Supongamos que tenemos dos cubos de madera perfectamente simétricos (uno es una copia exacta del otro), cada uno de dos centímetros de lado e inmersos en el espacio euclídeo $\mathbb{R}^3$. Uno de ellos, llamémoslo A, se encuentra centrado en el punto $(-2,0,0)$; el otro, B, en el punto $(2,0,0)$. Sus caras son paralelas a los ejes cartesianos.

¿Qué conjunto de puntos cubre cada uno de estos bloques? Por un lado, podemos decir que el conjunto de puntos (x,y,z) cubierto por A viene dado por:

$$\{-3 < x < -1,\ -1 < y < 1,\ -1 < z < 1\},$$

conjunto al que llamaremos C_1. Sin embargo, también podríamos decir que el conjunto de puntos que abarca A es el resultado de añadir a C_1 los puntos del borde de C_1:

$$\{-3 \leq x \leq -1,\ -1 \leq y \leq 1,\ -1 \leq z \leq 1\}.$$

Llamemos a este conjunto C_2.

Si decidimos que A ocupa el conjunto C_1, diremos que es un sólido *abierto*; si ocupa C_2, diremos que es *cerrado*. Las mismas consideraciones se aplican al bloque B. Y, dado que cada uno es una copia exacta del otro, o bien ambos bloques son abiertos, o bien ambos son cerrados.

Analicemos cada una de las posibilidades. Si A y B son abiertos, jamás podremos lograr que entren en contacto: si los desplazamos hacia el origen de coordenadas, siempre habrá un plano que los separe; a saber, el conjunto de puntos con coordenadas $(0,y,z)$. Pero, si A y B son cerrados, tampoco podremos conseguir que se toquen: dado que ningún punto del espacio puede estar ocupado por A y B al mismo tiempo, ambos bloques siempre estarán separados por una distancia ε, tal vez diminuta, pero finita en cualquier caso.

No obstante, todos somos capaces de imaginar dos bloques idénticos en contacto. Así pues, parecería que hay algo en la formulación del espacio euclídeo que no acaba de corresponder del todo a nuestra concepción intuitiva de los objetos sólidos.

Consideremos otro ejemplo. Supongamos que tenemos una hoja de papel de 10 centímetros de ancho y 10 de alto. La hoja se encuentra en el plano euclídeo, centrada en el origen de un sistema de coordenadas cartesiano. ¿Podemos dividir la hoja en dos rectángulos perfectamente simétricos?

La respuesta parece sencilla. Tomemos unas tijeras y cortemos la hoja de papel a lo largo del eje vertical. De esta manera obtendremos dos rectángulos, cada uno de 50 centímetros cuadrados. Misión cumplida.

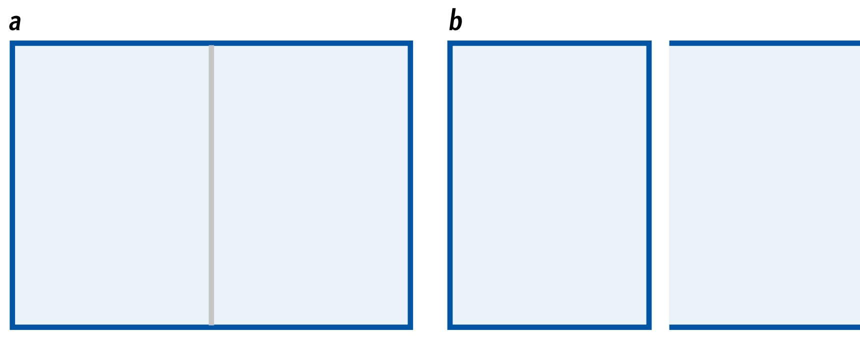
Pero ¿qué ocurre con la región que se encuentra justo sobre el eje de coordenadas? ¿A cuál de las dos mitades pertenece? Está claro que no puede formar parte de ambas. Pero, si pertenece a una mitad y no a la otra, estas no serán simétricas: una ocupará un conjunto de puntos que incluye su propio borde, mientras que la otra no. ¿Acaso resulta imposible dividir una hoja en dos mitades idénticas?

Una reacción bastante natural ante la situación que acabamos de describir es la siguiente: no hay ninguna diferencia real entre suponer que una hoja de papel ocupa una región cerrada del plano y suponer que ocupa la misma región con excepción de su borde. Si bien la formulación del espacio euclídeo sugiere que tal diferencia existe (y que, por tanto, ambas mitades no serían idénticas), eso no parece ser más que un artificio de nuestro formalismo. De igual modo, no habría ninguna diferencia real entre suponer que un bloque de madera corresponde a un sólido abierto o a uno cerrado.

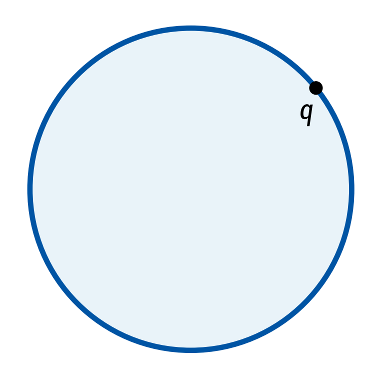
Consideremos esta sugerencia con un poco más de cuidado.

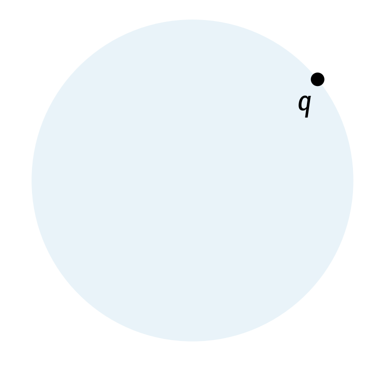
Conjuntos con y sin borde

Antes de continuar, comencemos por recordar un par de definiciones básicas. Dado un punto p del plano euclídeo $\mathbb{R}^2$,



OBJETOS Y BORDES: Si una hoja de papel se identifica con una región del plano (*a*) con bordes (*azul oscuro*), no parece haber manera de dividirla en dos mitades idénticas, ya que los puntos del eje vertical (*gris*) solo podrán asignarse a una de ellas (*b*).





CLAUSURA E INTERIOR: Dada una región R del plano, sus puntos de acumulación q son aquellos cuyo entorno incluye siempre un punto de R y uno ajeno a R. La clausura de R (*izquierda*) se define como el resultado de añadir a R todos sus puntos de acumulación (*azul oscuro*). El interior de R (*derecha*) corresponde a todos los puntos de R que no son puntos de acumulación. Un conjunto del plano es «canónico» si y solo si coincide con el interior de su clausura.

el *entorno* de radio ε alrededor de p viene dado por todos los puntos cuya distancia a p es estrictamente menor que ε. Dicho de otro modo, el entorno de radio ε de p es el disco abierto —sin incluir el borde— centrado en p y con radio ε.

Consideremos ahora una región cualquiera R de $\mathbb{R}^2$ y un punto q. Diremos que q es un *punto de acumulación* de R si, para todo número ε (por pequeño que sea), el entorno de radio ε de q contiene al menos un punto de R y al menos uno del complemento de R. En otras palabras: si toda circunferencia centrada en q (sin importar cuán diminuta sea) contiene un punto de R y uno que no esté en R.

A modo de ejemplo, pensemos en la región H ocupada por nuestra hoja de papel:

$$H = \{(x, y) : -5 \le x \le 5,\ -5 \le y \le 5\}.$$

El punto $(0, 5)$ es un punto de acumulación: toda circunferencia centrada en $(0, 5)$ incluirá siempre un punto de H (a saber, $(0, 5)$) y, al menos, un punto $(0, y)$ con $y > 5$ (y, por ende, en el complemento de H). En cambio, el punto $(0, 4)$ no es un punto de acumulación: el entorno de radio 1/2 de $(0, 4)$ solo contiene puntos de H, sin incluir ninguno exterior a H.

Con estas herramientas ya podemos definir en términos precisos la estrategia mencionada más arriba. La idea puede enunciarse así: no hay ninguna diferencia real entre decir que un objeto ocupa una región R y decir que ocupa el conjunto que resulta de añadir a R uno o más de sus puntos de acumulación.

Así pues, no habría ninguna distinción real entre afirmar que la mitad izquierda de la hoja ocupa el conjunto de puntos

$$H_I = \{(x, y) : -5 < x < 0,\ -5 < y < 5\},$$

o la región

$$H_I^+ = \{(x, y) : -5 \le x \le 0,\ -5 \le y \le 5\},$$

ya que cada miembro de H_I^+ o bien pertenece a H_I, o bien es uno de los puntos de acumulación de H_I.

De la misma manera, no habría ninguna diferencia entre decir que la hoja de papel ocupa la región H y decir que ocupa la región $H_I \cup H_R$ (donde H_R se define de manera análoga a H_I: la mitad derecha de la hoja sin sus puntos de acumulación). A fin de cuentas, todos los puntos de H que no están en $H_I \cup H_R$ son puntos de acumulación de $H_I \cup H_R$.

Parece que este método nos permite resolver el problema inicial. Si nuestra hoja de papel ocupa la región $H_I \cup H_R$, ahora sí podemos dividirla en dos partes simétricas: las regiones H_I y H_R.

Con todo, nuestro nuevo modelo matemático contiene un gran número de conjuntos cuya diferencia no representa ninguna distinción real entre objetos concretos. Así ocurre, por ejemplo, con H y $H_I \cup H_R$: aunque se trata de dos conjuntos distintos, ambos representan la misma hoja de papel. ¿Podemos eliminar esta redundancia? ¿Qué sucede si damos un paso adicional y nos olvidamos de los puntos de acumulación? Tal vez eso nos permita trabajar en un espacio matemático en el que la diferencia entre dos regiones cualesquiera siempre corresponda a una diferencia real entre objetos.

Eliminar los bordes

Si R es un conjunto cualquiera de puntos en $\mathbb{R}^2$, definiremos la *clausura* de R como la unión de R y todos sus puntos de acumulación. Por otro lado, diremos que el *interior* de R es el conjunto de todos los puntos de R que no son puntos de acumulación. Por último, estableceremos que un conjunto R es un *conjunto canónico* si y solo si es igual al interior de su clausura. Podemos pensar en un conjunto canónico como en una región del plano sin bordes ni «grietas».

Por ejemplo, el interior de H es un conjunto canónico. En cambio, H no, pues los puntos que están en el borde no son miembros del interior de su clausura. Tampoco es canónico $H_I \cup H_R$, ya que, aunque carece de bordes, tiene una «grieta» en el medio (de hecho, el interior de su clausura coincide con el interior de H: un conjunto distinto de $H_I \cup H_R$).

Cada conjunto R imaginable tiene asociado un único conjunto canónico: el que se obtiene al tomar el interior de su clausura. De esta manera, si restringimos nuestra atención a los conjuntos canónicos del espacio, habremos resuelto la redundancia que mencionábamos al final del apartado anterior.

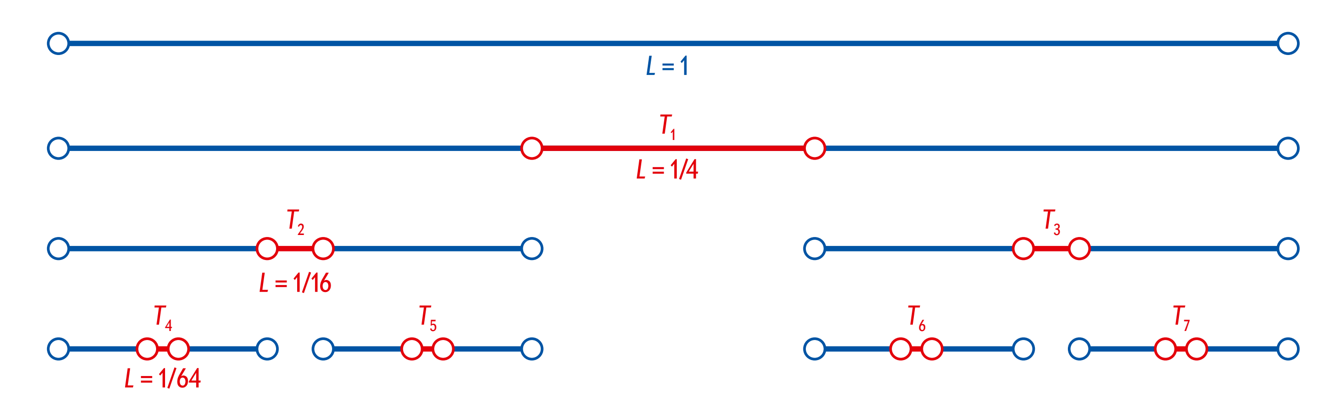
Por otro lado, podemos definir la unión de dos conjuntos canónicos como el conjunto canónico que corresponde a su unión estándar, y el complemento de un conjunto canónico como el conjunto canónico que corresponde a su complemento estándar. Esto ya nos proporciona suficiente material para empezar a trabajar. Por ejemplo:

- Si un objeto A ocupa una región correspondiente al conjunto canónico R, y un objeto B ocupa una región que corresponde al conjunto canónico R', el «objeto» que resulta de pensar en A y B como en un único cuerpo ocupa el conjunto canónico correspondiente $R \cup R'$.
- Si A es parte de B, la intersección de R con R' es igual a R.
- Si R y R' son dos conjuntos diferentes con $R \subset R'$, entonces puede existir un objeto que ocupe la subregión de R' que no está contenida en R.

Todas estas relaciones entre conjuntos canónicos se corresponden a la perfección con nuestras nociones intuitivas sobre los objetos sólidos. Y, de hecho, en este modelo que solo contempla la existencia de conjuntos canónicos, nuestra hoja de papel puede dividirse sin mayores problemas en dos mitades simétricas.

El problema del área

Ahora podemos identificar la clase de conjuntos canónicos con aquellas regiones del espacio que pueden ser ocupadas por objetos sólidos. De esta manera, dos



¿CUÁNTO MIDE? Partiendo del intervalo abierto de longitud unidad (*arriba*), los segmentos rojos (T_i) se obtienen al suprimir, en etapas sucesivas, los intervalos centrales de longitud 1/4, $(1/4)^2$, $(1/4)^3$... de los segmentos que sobreviven en cada etapa (*azul*). Si todos los intervalos se consideran sin bordes (*puntos huecos*), resulta imposible asignar una longitud a la unión de todos los T_i.

conjuntos canónicos (dos regiones del espacio) serán diferentes si y solo si puede existir un objeto capaz de ocupar una de ellas pero no la otra. Parece, pues, que los conjuntos canónicos proporcionan un buen modelo matemático para estudiar las propiedades de los objetos concretos. Recordemos que en este espacio no hay puntos de acumulación (no hay bordes) y que, para cada región del espacio, puede que haya un objeto que la ocupe.

Por desgracia, este modelo tiene sus limitaciones. Sabemos que no todo conjunto de $\mathbb{R}^2$ tiene un área bien definida (en concreto, sabemos que existen conjuntos de $\mathbb{R}^2$ «no medibles»; *véase* «Colecciones no medibles», por Agustín Rayo; Investigación y Ciencia, octubre de 2012). Eso no resultaría tan sorprendente si permitiéramos la existencia de conjuntos de $\mathbb{R}^2$ «no ocupables». Sin embargo, si las regiones canónicas han de corresponder a las regiones ocupables del espacio, deberíamos poder asignar un área a cada una de ellas.

Para asociar un área bien definida a cada región canónica R, debería existir una función A que asocie a cada conjunto canónico R un número real $A(R) \geq 0$ con las siguientes propiedades:

- Si $R \subseteq R'$, entonces $A(R) \leq A(R')$.
- Si un objeto que ocupe la región R puede desplazarse hasta ocupar la región R', entonces $A(R) = A(R')$.
- Si R_1, R_2... es un conjunto numerable de regiones disjuntas, el área de la región que resulta de combinar todos los R_i no puede ser mayor que la suma de las áreas de los R_i.

Sin embargo, es posible demostrar que no puede existir una función que cumpla todas esas propiedades. Para verlo, consideremos un caso más sencillo: en vez de conjuntos canónicos de $\mathbb{R}^2$, tomemos conjuntos canónicos de la recta real; y en lugar de considerar su área, A, pensemos en su longitud, L.

Resulta posible definir un conjunto numerable T_1, T_2... de regiones canónicas con las siguientes propiedades:

- La unión de los T_i es un conjunto canónico de longitud 1.
- La suma de las longitudes de los T_i es 1/2.

La construcción de las regiones T_i puede llevarse a cabo por etapas:

1. Comencemos con un intervalo canónico de longitud 1, al que llamaremos I_1, y consideremos el intervalo canónico situado en el centro de I_1 y de longitud 1/4. Llamemos T_1 a ese intervalo central.

2. Ahora tomemos los dos subintervalos I_2 e I_3 que resultan al eliminar T_1 de I_1. Llamemos T_2 y T_3 a los intervalos situados en el centro de I_2 e I_3, respectivamente, y cuya longitud es $(1/4)^2 = 1/16$.

3. Al eliminar T_2 y T_3, obtendremos dos subintervalos de I_2 y dos subintervalos de I_3. En cada uno de ellos, tomemos los intervalos centrales de longitud $(1/4)^3 = 1/64$, a los que llamaremos T_4, T_5, T_6 y T_7.

Etcétera. En general, en la etapa n obtendremos 2^{n-1} intervalos T_i de longitud $(1/4)^n$, de modo que:

$$\sum_i L(T_i) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{n-1}}{4^n} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \cdots = \frac{1}{2}$$

Pero, por otra parte, es fácil comprobar que el conjunto canónico correspondiente a $T = \cup T_i$ es I_1 (ya que cada punto de I_1 o bien está en T, o bien es un punto de acumulación de T), cuya longitud es 1.

El conjunto T presenta, además, una curiosa propiedad. Consideremos el complemento de T en I, al que llamaremos T^*. Dado que la longitud de I es 1 y la de T es 1/2, T^* también debería medir 1/2. Pero, desde el punto de vista topológico, T^* es el conjunto de todos los puntos de acumulación de T. Así que la región correspondiente a T parece tener un borde cuya longitud es igual a la de T.

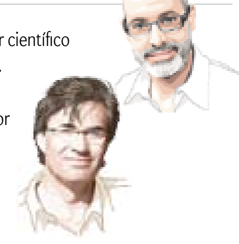
Conjuntos como T y T^* son, matemáticamente hablando, bastante extraños. Están bien definidos, pero resulta casi imposible pensar que corresponden a regiones que podrían estar ocupadas por objetos físicos.

Así pues, parece que seguimos sin entender bien las regiones «ocupables» del espacio. Disponemos de una teoría matemática de gran belleza (la combinación de la topología, la teoría de la medida, y la geometría euclídea) llena de idealizaciones de las que no sabemos cómo deshacernos. Y puede que esto no sea un accidente: tal vez criaturas con nuestras limitaciones cognitivas necesiten estas idealizaciones para poder entender el mundo que las rodea.

PARA SABER MÁS

Una discusión bastante accesible sobre las motivaciones para desarrollar una geometría «sin bordes» es **Are there really instantaneous velocities?**, de Frank Arntzenius; *The Monist*, vol. 83, n.º 2, abril de 2000. El modelo de conjuntos canónicos fue estudiado por Alfred Tarski en **Les fondements de la géométrie des corps**; *Annales de la Société Polonaise de Mathématiques*, págs. 29-34, 1929. El gran matemático Dana Scott, de la Universidad Carnegie Mellon, está trabajando en un proyecto llamado «geometría sin puntos». Hace poco Scott presentó parte de su trabajo en una charla en la Universidad de Edimburgo: **https://youtu.be/sDGnE8eja5o**

por Marc Boada y Víctor Grau



Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.

Víctor Grau, doctor en física, es profesor de didáctica de las ciencias en la Universidad de Vic.

El kapnoscopio: ver para creer

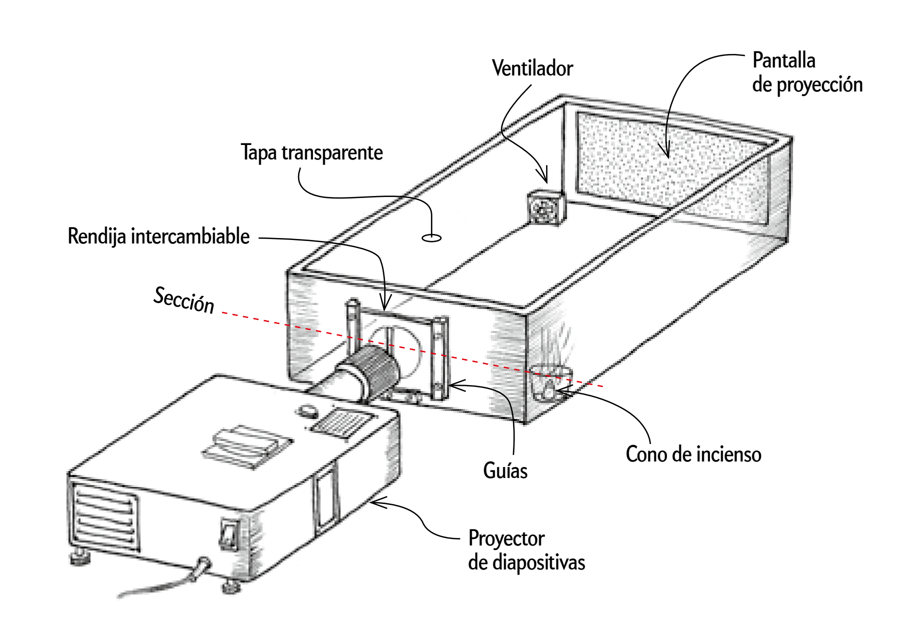
La manipulación de la luz mediante lentes, espejos y filtros resulta difícil de observar. Un sencillo artefacto de comodísima construcción facilita enormemente la tarea y permite experimentar en clase con la óptica geométrica

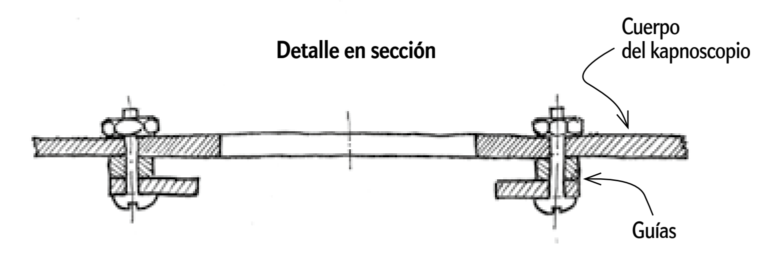
Leonardo, Newton y otros muchos ya observaron que la luz, a falta de algo que la manifieste, es invisible. El rayo lumínico que se adentra en una estancia a oscuras es solo perceptible si se dispersa en sutilísimas partículas de polvo —en un ambiente diáfano, sería invisible—. En esta ocasión, proponemos aprovecharnos de este sencillo truco para facilitar el aprendizaje de la óptica geométrica, materia de interés para numerosos estudiantes y también para experimentadores aficionados.

Debo a mi buen amigo y coautor de esta colaboración, Víctor Grau, profesor de didáctica de las ciencias en la Universidad de Vic, la descripción de las sutilezas del artefacto que hoy traemos a estas páginas. Buscando maneras de mostrar y enseñar a alumnos de primaria los principios de la óptica, descubrió el aparato en forma de breve referencia en una vieja publicación de la Unesco: *Nuevo manual de la Unesco para la enseñanza de las ciencias* (1973). Cansados de nombrarlo de una forma tan poco clara como «caja de humo», lo hemos bautizado con el nombre de «kapnoscopio» (del griego clásico *kapnòs*, «humo», y *skopein*, «observar»). Consiste, en esencia, en una caja convenientemente modificada para observar, mediante un poco de humo, lo que ocurre en su interior. Procedamos a su descripción detallada y luego nos adentraremos en sus aplicaciones.

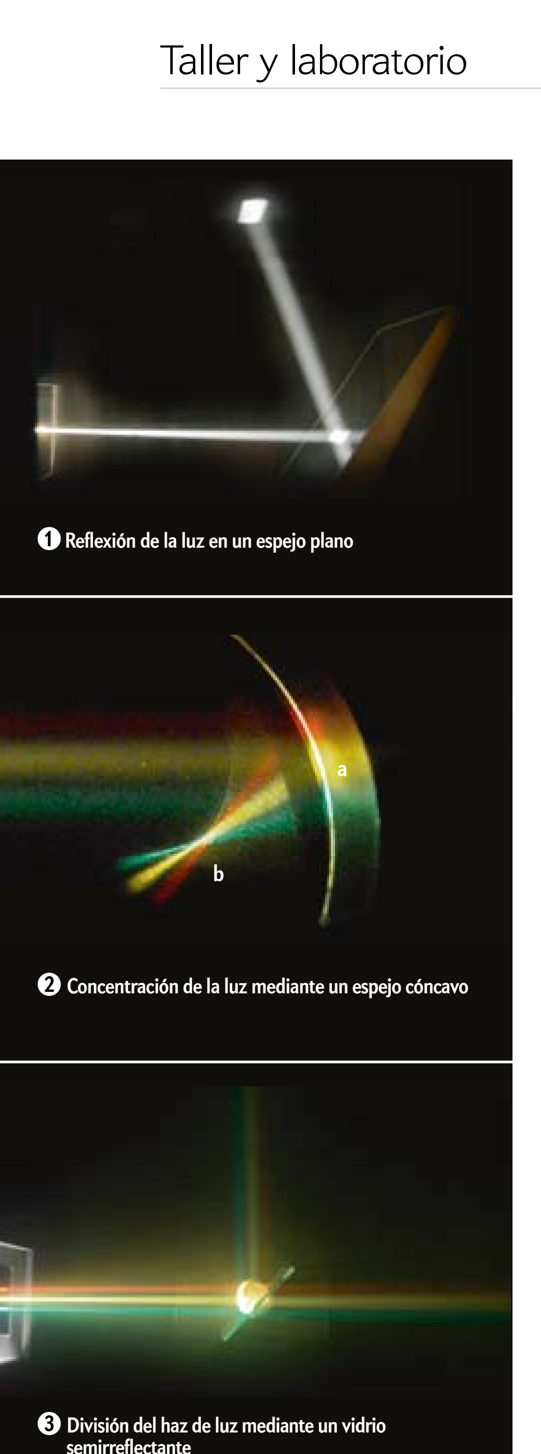
Para la construcción del kapnoscopio podríamos aprovechar una caja de botellas de vino (de las de seis unidades), una caja de botas o zapatos bien grandes, o incluso una caja de regalo. Pero resulta mucho más interesante partir de cero. En este caso, el cartón pluma de color negro será el material de primera elección. Uniremos las distintas partes con cinta de papel engomado, que encontraremos en librerías y comercios del ramo. Las medidas recomendadas son unos 380 × 290 milímetros para la base y unos 200 milímetros para la altura. (En caso de haber aprovechado una caja no negra, deberemos aplicar en su interior una buena capa de pintura negra y mate.)

La caja debe poder abrirse por arriba y, además, la tapa debe ser transparente para observar el interior. Podemos escoger entre diversos materiales. Muy duradero es el cristal; sin embargo, por su fragilidad, no lo recomendamos en el laboratorio escolar. Más seguro, pero caro, es el metacrilato. Y de ningún modo podemos prescindir, si el presupuesto es bajo, del acetato o el celofán. Sea como fuere, la tapa debe ser sólida y cerrar con precisión sobre el cuerpo del arca. Hemos ensayado tapas deslizables —quizá las menos prácticas, sobre todo para el trabajo en el aula—, otras con bisagras y también tapas sueltas que simplemente se apoyan por gravedad. Son estas últimas las que mejor resultado proporcionan.





VÍCTOR GRAU (*fotografías*); MARC BOADA (*dibujos*)



❶ Reflexión de la luz en un espejo plano

❷ Concentración de la luz mediante un espejo cóncavo

❸ División del haz de luz mediante un vidrio semirreflectante



❹ Refracción de tres haces en una lámina transparente gruesa

Recortaremos una amplia ventana en la pieza que cierra por arriba y la recubriremos con las materias transparentes que antes citábamos; opcionalmente, repetiremos lo mismo en una de las caras laterales estrechas. Allí, en vez de una lámina transparente, colocaremos un papel vegetal, a modo de pantalla de proyección. En la cara opuesta, enfrentada a la pantalla de proyección, abriremos un amplio agujero cuadrado por el que se introducirá la luz en el espacio de trabajo.

Esta última es, quizá, la parte más delicada, ya que deberá recibir distintos accesorios. Expliquémonos. Por este agujero, y proveniente de algún manantial luminoso, deben entrar haces de luz con distintas geometrías. En ciertas ocasiones nos interesará un haz circular y amplio; en otras, bien estrecho. Por ello vale la pena poner en la parte exterior de la caja un par de guías en las que encajen fácilmente los diafragmas que modularán los rayos de luz. Aquí el experimentador puede optar por distintas estrategias, siendo el esquema propuesto tan solo orientativo.

Centrémonos ahora en el manantial de humo, que, gracias a sus partículas, nos permitirá visualizar los distintos fenómenos. La opción más fácil consiste en proveerse de algunos conos de incienso. Los encontraremos en comercios dedicados al ocultismo y las paraciencias; escogeremos los que produzcan algún olor que nos resulte agradable, ya que pasaremos varias horas olfateando sus aromas. (No son tan cómodas las varillas de sándalo: difíciles de apagar, ocupan espacio y ponen en riesgo la tapa transparente.) Colocaremos el cono aromático en un objeto resistente al calor; un pequeño molde para hacer flanes, de acero inoxidable o aluminio, funciona maravillosamente. Llegado el momento, extinguiremos la brasa tapándolo con un disco metálico o un objeto similar.

Una mejora singular es la introducción en la caja de humo de un diminuto ventilador procedente de algún artilugio electrónico en desuso. Incluso un ventilador a pilas, convenientemente modificado y montado en la pared del artefacto nos permitirá homogeneizar la atmósfera interior y observar mucho mejor todo cuanto ocurre. Eso sí, es importante que el flujo de aire no incida directamente en el cono ardiente, ya que, de lo contrario, su combustión se aviva en exceso.

Pasemos ahora al segundo componente crítico: la fuente de luz. La primera elección pasa por rescatar del baúl de los recuerdos aquel proyector de diapositivas que hace años que duerme ocioso, extinguido por las nuevas tecnologías. Nos proporcionará un haz abierto y muy luminoso, que, jugando con el objetivo, convertiremos en cilíndrico. Si se resiste, pondremos en el lugar de la diapositiva un cartón negro en el que abriremos una ventana circular. Más paralelos serán los rayos si apostamos ante el objetivo un segundo diafragma que contribuirá a cerrar el haz. Ensayaremos distintas distancias y diámetros.

Si no contamos con ningún proyector, podemos utilizar linternas de un solo led, a las que acoplaremos lentes y diafragmas e incluso espejos cóncavos. Con todo ello a punto, habrá llegado el tan esperado momento de acometer los experimentos.

Algo que todos sabemos, pero que no es tan obvio para el mocerío, es que la luz viaja, al menos aquí en la Tierra, en línea recta. Pongamos en las guías de la caja una cartulina negra, con una ranura (cortada con cúter) de un milímetro de ancho y 30 o 40 milímetros de largo; tapemos la pantalla de proyección de la cara opuesta, ahora innecesaria, y encendamos el cono de incienso y la fuente de luz. Activemos durante unos segundos el ventilador para dispersar las venas de humo.

Aparecerá dentro de la caja un rayo rectilíneo que la atraviesa sin distorsión. En una habitación débilmente iluminada, será perfectamente visible sobre el fondo negro. Los más jóvenes «alucinan» ya con semejante obviedad. Aprovechemos su interés.

Abramos rápidamente la caja y coloquemos un espejo que intercepte el trayecto de los fotones. (Encontraremos espejos recortables en tiendas de precio único que montaremos sobre una bola de plastilina negra.) La luz se reflejará y comprobaremos visualmente las principales leyes de la reflexión ❶.

El siguiente paso consiste en montar en las guías un conjunto de tres rendijas de no más de un milímetro de ancho, con una separación entre ellas de un centímetro. A cada una le aplicaremos un filtro de color distinto. Observaremos cómo, tras la reflexión, la posición de los haces se invierte (el color inicialmente situado a la derecha quedará ahora a la izquierda y viceversa). Hacerse con filtros de color es relativamente fácil. Aparte de las «gelatinas» de uso profesional, podemos utilizar las tapas de una carpeta de plástico, habitualmente teñidas de bellos tonos, o incluso acetato pintado con un simple rotulador permanente.

Sustituyamos ahora el espejo plano por uno cóncavo. Si bien podemos hallar uno en cualquier tienda de cosmética (los espejos de aumento que se utilizan en el baño para ver ampliados los defectos de nuestra piel), dará mejor resultado un espejo concentrador procedente de algún microscopio biológico ❷. En ese caso, el kapnoscopio rinde un segundo servicio: permite medir

con enorme facilidad la distancia focal del reflector, la que hay entre el centro de simetría del espejo (*a*) y el punto donde se unen los tres rayos de luz (*b*).

Merece la pena entregar al alumnado una pequeña panoplia de materiales con los que investigar sus propiedades. Una pieza lisa pintada de color blanco brillante se comportará de forma muy distinta a otra de acabado mate. También nos serán útiles las esferas reflectantes con las que decoramos el árbol de navidad o algún prisma extraído de unos prismáticos rotos.

Más aún, es relativamente fácil montar sistemas de espejos que cumplan la función de retrorreflectores o periscopios, o buscar en alguna vidriería próxima algún retal de vidrio semirreflectante que fijaremos sobre una bola de plastilina blanca. Ello permite observar que parte de la luz se refleja y parte lo atraviesa ❸.

Pasemos ahora a la óptica refractiva. Para ello seguiremos usando el conjunto anterior de tres rendijas. Pongamos en cada una un filtro de color (las imágenes corresponden a experimentos con rojo, amarillo y verde, pero es conveniente usar rojo, verde y azul, los colores primarios). Dentro del kapnoscopio, y cortando perpendicularmente el trayecto de la luz, pongamos una lámina espesa de caras planas y paralelas de cualquier material transparente. Los rayos la atravesarán imperturbables.

Si giramos la lámina de forma que los haces de color incidan con cierto ángulo, veremos que estos emergen desplazados, observación que nos remite a la conocida imagen de una varilla sumergida en un vaso de agua ❹.

A continuación, supliremos la lámina por una lupa de mano (lente convergente) que habremos fijado a un taco de madera, garantizando así su posición vertical estable. Los haces de luz se concentrarán en un punto, el foco ❺.

Aquí la imaginación desempeña un papel importante. ¿Qué pasa si ponemos un bote de cristal lleno de agua emulando una lente cilíndrica? ¿Y si, en vez de agua, utilizamos glicerina, alcohol o una disolución concentrada de azúcar? El alumno cuenta con un amplio margen de experimentación, suficientemente accesible como para que el éxito esté garantizado. El abanico de posibilidades es enorme: cilindros de metacrilato, bolas de cristal, cuentahílos... todo podrá servirnos. En la imagen ❻, los haces de colores inciden sobre un cilindro de cristal y se concentran en la superficie posterior.

Adentrémonos ahora en los sistemas compuestos de varias lentes. Un telescopio astronómico se imita a pequeña escala con dos lentes, una grande de foco largo y otra más reducida de foco corto. Para descubrir cómo funciona un anteojo galileano, buscaremos, para el ocular, una lente negativa, plano-cóncava o bicóncava (si no encontramos ninguna podemos fabricarla al torno). Resulta práctico poner en la guía un diafragma en el que habremos recortado una ventana en forma de «F». Ajustando la posición y la distancia de las lentes lograremos proyectar la letra en la ventana lateral, que hasta ese momento ha permanecido cerrada. Si empleamos dos lentes positivas, la «F» aparecerá invertida; con una lente negativa en el ocular, en cambio, la veremos derecha.

Transitemos ahora a investigar la naturaleza del color. Para empezar, ubiquemos en el interior de la caja distintos filtros que intersecten el trayecto de un rayo de luz blanca. Después, utilicemos de nuevo las tres rendijas coloreadas. Los alumnos descubrirán intuitivamente la función de los filtros y la absorción selectiva de los colores. Apliquemos un filtro rojo perpendicular a los haces y veremos que deja pasar la luz roja y la amarilla, pero no la verde ❼.

Un paso más sorprendente consiste en colocar en las guías una placa en la que habremos abierto tres agujeros de un par de centímetros de diámetro. Cada uno lo dotaremos de un filtro distinto: azul, verde y rojo. Ahora, pongamos dentro del kapnoscopio, sin humo en este caso, una barra vertical que intercepte parcialmente el paso de la luz, y, al fondo, una pantalla blanca de proyección. ¿De qué color serán las sombras? De los complementarios, claro. La mezcla aditiva de colores es quizás uno de los fenómenos que más sorpresa genera entre los jóvenes experimentadores.

Mucho más conocido es el comportamiento de los prismas. Es relativamente fácil construir uno equilátero de metacrilato con el que mostrar la dispersión de la luz blanca o el distinto ángulo de refracción para cada uno de los colores. En la última fotografía ❽, podemos ver el ángulo con el que se refracta la luz cuando atraviesa un prisma.

Los más manitas pueden improvisar cubetas con diversos ángulos entre caras que rellenarán con agua o glicerina, emulando así prismas de grandes dimensiones en los que la dependencia del ángulo de refracción según el color se manifiesta sin problemas. Incluso podremos ensayar fenómenos de dispersión próximos a las redes de difracción utilizando retales de discos compactos, o de *blue ray*. En suma, el kapnoscopio pone a nuestro alcance un pequeño universo óptico.

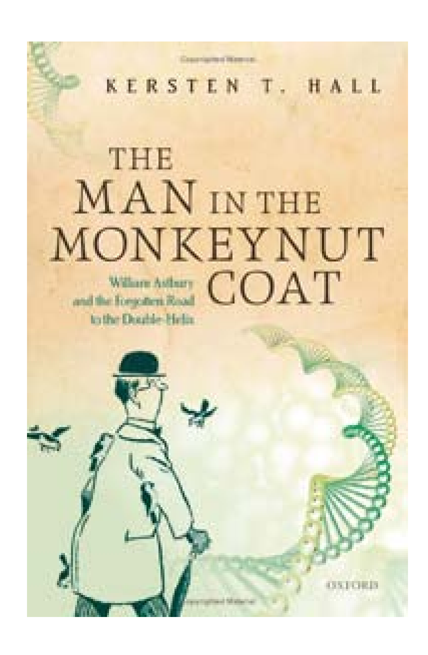


❺ **Concentración de la luz mediante una lente convergente (lupa)**

❻ **Concentración de la luz en la superficie de un cilindro de cristal**

❼ **Absorción de la luz verde por un filtro rojo**

❽ **Refracción de la luz en un prisma de metacrilato**



THE MAN IN THE MONKEYNUT COAT, WILLIAM ASTBURY AND THE FORGOTTEN ROAD TO THE DOUBLE-HELIX

Por Kersten T. Hall. Oxford University Press, Oxford, 2014.

ADN

Una desconocida preparación del camino

El hilo conductor de esta espléndida biografía se teje con la archiconocida confesión de Isaac Newton, en la que declaró que había logrado sus monumentales descubrimientos porque pudo ver más lejos al encaramarse a hombros de gigantes. (En realidad, la paternidad de la frase corresponde, según John de Salisbury, del siglo xii, a su maestro Bernardo de Chartres.) En el caso del libro de Kersten T. Hall, el tema es la paternidad del descubrimiento de James Watson y Francis Crick, en 1953, de la estructura en doble hélice de la molécula de ADN, uno de los hitos miliares de la historia de la ciencia. Esa configuración helicoidal transformó nuestro conocimiento de la forma en que opera la herencia y abrió la posibilidad de fabricar nuevos fármacos de importancia vital, como la insulina recombinante. La doble hélice se ha convertido en la imagen de nuestro tiempo. Sobre su hallazgo pareciera que todo estaba escrito con la publicación, en 1968, de *The double helix* por Watson.

Tuvo, sin embargo, sus preámbulos; los gigantes que prestaron sus hombros. Andando el tiempo se reconocería la determinante contribución de Rosalind Franklin, cuya famosa fotografía 51 mostraba el patrón de dispersión de rayos X producido por el ADN, la clave que permitió resolver su estructura. Ahora bien, Franklin se basaba también sobre el trabajo de otros. No fue la primera en recurrir a los rayos X para explorar la estructura del ADN. A su vez, ella se aupó a hombros de otro gigante, William T. Astbury.

Dos años antes del célebre descubrimiento de la estructura del ADN, Watson había asistido a una conferencia celebrada en Nápoles, donde Maurice Wilkin, del King's College de Londres, mostró una serie de fotografías, obtenidas con su discípulo Raymond Gosling; recogían los motivos generados cuando las moléculas de ADN dispersaban haces de rayos X. Aquellas manchas, ordenadas, sobre las instantáneas constituían una prueba poderosa de que el ADN contenía regiones cristalinas; en otras palabras, encerraba una estructura regular iterativa. Tal regularidad convenció a Watson de que en el seno de esa estructura residía el secreto de la transmisión de la información genética. Aquel era su camino, pensó.

Y comenzó a trabajar en Cambridge con Francis Crick, construyendo con cartón y alambre modelos hipotéticos de una molécula de ADN. Para vencer dificultades iniciales invitaron a Cambridge a Wilkins y a la colega de este en sus tareas cristalográficas, Rosalind Franklin, quien les descubrió los errores de química general que habían cometido en su boceto. Lawrence Bragg, director del departamento, les impuso entonces que dejaran de lado su incursión en el ADN y volvieran a sus primeras tareas asignadas: Crick a la estructura de la hemoglobina y Watson a la de los virus.

Para mayor desazón, a finales de 1952 llegaron noticias de que Linus Pauling estaba preparando un artículo sobre la estructura del ADN. Pauling era considerado el mayor químico estructuralista de su tiempo; un año antes había superado al equipo de Bragg en la solución del plegamiento helicoidal de las proteínas. Pero cuando Watson obtuvo una copia del artículo de Pauling respiró aliviado. Aquello no podía funcionar. Era el momento de reanudar con Crick los trabajos sobre el ADN. Tomó el tren de Londres, para verse de nuevo con Wilkins y Franklin.

A sus treinta años, Franklin se había hecho un nombre en cristalografía de rayos X, técnica que permite deducir la estructura de las molécula a partir de la dispersión de los rayos X. En razón de su forma particular y repetición de la disposición en el espacio, las moléculas dispersaban o difractaban de una manera u otra los rayos X, que podían registrarse en diversos patrones de manchas negras sobre una película. Mediante un análisis cuidadoso y la aplicación de determinados métodos matemáticos, se infería la forma física de la molécula a partir de las manchas. Tras pasar varios años investigando en París esta técnica aplicada a moléculas basadas en el carbono, Franklin llegó al King's College.

A espaldas de Franklin, Wilkins le enseñó a Watson una sorprendente radiografía del ADN, la «foto 51», realizada por aquella. Al ver la cruz que perfila la foto, Watson pensó en una estructura helicoidal subyacente. La fotografía sirvió para confirmar el modelo en que había trabajado con Crick y convencer a Bragg de que les permitiera retomar sus trabajos sobre la estructura del ADN. Tardaron escasas semanas en terminar su modelo definitivo de ADN y remitieron su ahora famoso artículo a *Nature*. Nueve años más tarde, Crick, Watson y Wilkins recibieron el premio Nobel.

En el artículo de *Nature* hay una brevísima alusión a Franklin. Pero en los discursos de recepción del galardón, ni Watson ni Crick la mencionaron; algo más objetivo fue Wilkins. Watson cayó incluso en la crueldad de la vejación, negándole solvencia científica. No pudo percatarse, afirmaba Watson, del alcance de la fotografía, porque era obstinadamente contraria a la idea de hélice. Un juicio carente de fundamento, pues una de las grandes contribuciones de Franklin había sido demostrar que el ADN podía presentar dos conformaciones, según la humedad y el contenido hídrico. Con una humedad por debajo del 75 por ciento, la molécula adoptaba una configuración compacta, que Franklin denominaba «forma A»; con una humedad de entre el 75 y el 92

por ciento, la conformación era más fina y larga. Esta era la conformación que se suponía más verosímil en el ADN en un entorno celular originario; Franklin la denominó «forma B». Cada una de las formas producía un patrón de difracción de rayos X característico.

La mayor parte del trabajo de Franklin se desarrolló sobre la forma A, de la que no se infería una estructura helicoidal con claridad. Pero lejos de ser «obstinadamente contraria», su colega Aaron Klug descubrió un borrador de ensayo que había escrito poco antes del artículo de Watson y Crick, en el que declaraba su convencimiento de que el trabajo que estaba realizando sobre la forma B sí sugería una estructura helicoidal. ¿Por qué no dio el paso definitivo y posibilitó que se le adelantaran Watson y Crick? Según todos los indicios, estaba confirmando meticulosamente todas las posibilidades de la forma A, antes de reanudar el trabajo sobre la forma B.

Esa forma poderosa y enigmática de radiación (los rayos X) había sido descubierta en 1895 por Wilhelm Röntgen, en su laboratorio de Wurzburgo, mientras estudiaba los efectos del paso de la electricidad a través de un gas encerrado en una vasija a baja presión [*véase* «El descubrimiento de los rayos X», por Graham Farmelo; Investigación y Ciencia, enero de 1996]. Se trataba de una línea de investigación cuyo origen se remontaba a los experimentos de Michael Faraday de 1837. Años después, William Crookes descubrió que, cuando se aplicaba un alto voltaje a través de un gas confinado en un tubo a muy baja presión, el tubo emitía un resplandor misterioso; para su irritación, las placas fotográficas del laboratorio aparecían nubladas. Röntgen se encontró con el mismo fenómeno y lo atribuyó a la luz emitida por el tubo de descargas. Tapó con cartón negro la vasija de cristal. Para su sorpresa, las placas seguían nublándose y las pantallas cubiertas con platinocianuro de bario, un material fluorescente, comenzaron a brillar.

Röntgen llegó a la conclusión de que el tubo de descargas no solo emitía luz visible, sino también otra forma de radiación todavía sin identificar, que, a diferencia de la luz, podía atravesar un cartón negro. En honor de su descubridor, la nueva radiación se llamó radiación Röntgen. Pero en algunos lugares comenzó a denominarse rayos X, por su naturaleza desconocida. Muy pronto comenzaron a aparecer trabajos sobre sus aplicaciones: descubrimiento de cálculos renales, lesiones óseas y articulaciones reumáticas.

El gran salto hacia delante lo dieron William Bragg y su hijo Lawrence [*véase* «El nacimiento de la cristalografía de rayos X», por John Meurig Thomas; Investigación y Ciencia, junio de 2013]. En 1904 inició el primero su investigación sobre la emisión radiactiva de los rayos alfa. Estudió el papel penetrante de esas partículas emitidas por núcleos inestables del elemento radio. Le intrigaba la capacidad de las partículas alfa para arrancar electrones de los átomos de gas, dejándolo ionizado. Los rayos X compartían esa propiedad, lo que constituía, en su opinión, una prueba convincente de que se trataba de un chorro de partículas, no de ondas electromagnéticas. Pero los físicos andaban divididos sobre la cuestión. Charles Glover Barkla les asignaba una naturaleza ondulatoria.

En 1909 Bragg se hizo cargo de la cátedra Cavendish de física de la Universidad de Leeds, célebre por su industria textil basada en el procesamiento de la lana. Se había convertido, además, en centro importante del desarrollo de la fotografía. Su hijo Lawrence, que se había formado en matemática y física en Cambridge, obtuvo una ecuación sencilla, que lleva su nombre y que relacionaba la disposición espacial de los átomos en un cristal, el ángulo del haz de rayos X dispersado y la longitud de onda de los rayos X. Bragg padre desarrolló el instrumental necesario para someter a contrastación las ideas de Lawrence. Publicaron el primer trabajo conjunto en 1913, titulado «The reflection of X-rays by cristals», aparecido en *Proceedings of the Royal Society of London*, artículo que establecía los principios básicos de una nueva técnica, la «cristalografía de rayos X».

Astbury formó parte del grupo de cristalógrafos de rayos X reunidos en torno a William Bragg en la Institución Real en los años veinte. Entre los muchos jóvenes que conformaron el equipo inicial de Bragg, que abrirían nuevos campos a la cristalografía de rayos X, estaba Kathleen Yardley, con quien Astbury realizó los primeros trabajos. Juntos publicaron en 1924, en *Philosophical Transactions of the Royal Society*, un estudio denso: «Tabulated X-ray data for the examination of the 230 space-groups by homogeneous X-ray analysis», que transformaron luego en la *International tables for crystallography*, de uso vigente. La edición de esas tablas constituyó un hito en el desarrollo de la teoría de la estructura cristalina.

En mayo de 1928, el profesor Alfred F. Barker le escribió a William Bragg si conocía a alguien idóneo para el puesto recién creado de física textil en la Universidad de Leeds. Bragg le contestó que tenía a la persona ideal para el trabajo: «[Astbury] es un científico brillante... tenaz y perseverante, dotado de imaginación y espíritu investigador». El cargo comportaba aplicar la técnica de rayos X a las fibras de lana. Allí permaneció hasta su muerte, en 1961. Tras hablar con J. B. Speakman, que trabajaba sobre propiedades químicas de la lana, se determinó que todo lo relacionado con la física de la lana quedara reservado a Astbury.

En esas fechas solo se sabía que algunas prendas estaban tejidas en lana y que la lana, a su vez, se componía de un «coloide anfotérico» denominado queratina, una proteína carente de interés. Pero los escritos de Astbury que resumían sus trabajos en una serie de artículos de 1930 a 1935 llamaron la atención de la comunidad científica porque aportaban respuestas a una cuestión que había desconcertado a los bioquímicos durante muchos años. Se trataba de dilucidar la estructura y composición molecular de las proteínas. Unas, así la queratina, cumplían una función meramente estructural; otras, como las enzimas, eran auténticas máquinas; otras intervenían en el transporte de nutrientes esenciales, etcétera.

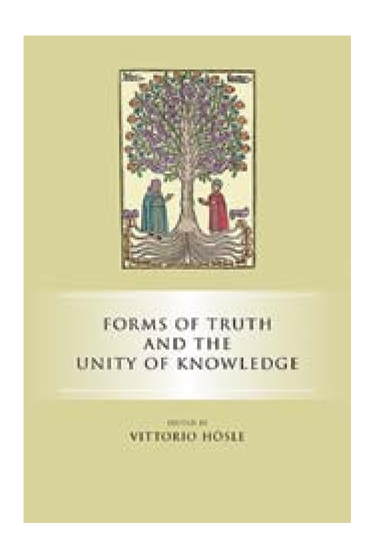
De los cinco ensayos publicados en ese período había uno cuya importancia trascendía el ámbito de los telares: las fibras de queratina lanar, extendidas y sin extender, daban origen a dos patrones de difracción de rayos X. Con ello no solo se indicaba la naturaleza de la proteína, sino también su forma posible de operación. Del patrón mostrado por la queratina sin extender, Astbury calculó que la cadena de aminoácidos se plegaba de una manera compacta; la llamó forma alfa. Cuando la lana se extendía hasta un 90 por ciento, se modificaba, de una manera sutil aunque significativa, el patrón producido por los rayos X, de donde se infería que la cadena había cambiado su configuración. Era la forma beta. Las mediciones de las dimensiones de la cadena proteínica de la queratina realizadas por Astbury resultaron de enorme utilidad para Linus Pauling.

Astbury introdujo el uso de rayos X para sondear la estructura de macromoléculas biológicas y realizó los primeros

trabajos de esa índole sobre ADN ya en 1937. Alcanzó la cima de esa línea de investigación en 1951: su equipo obtuvo una serie preciosa de fotografías de difracción de rayos X de ADN que mostraban exactamente el mismo patrón cruciforme que, dos años más tarde, sería un hito de la historia de la ciencia. Fue un inmenso error no percatarse de lo que tenía ante sus ojos. Que Astbury no viera nada singular en esa fotografía pudiera parecer una pifia garrafal. Pero ese juicio resulta apresurado. Su legado se extendió más allá del ADN. Convencido de que los métodos y las técnicas de la física arrojarían luz sobre nuestro conocimiento de la biología, ayudó a fundar una ciencia enteramente nueva, la biología molecular, en cuya entraña está la descripción de los sistemas vivos en términos de sus formas y estructuras macromoleculares componentes. Astbury mostró que la forma de las moléculas biológicas podían alterarse deliberadamente, idea que cobró expresión plástica en su gabán (de ahí el título del libro), fabricado con proteínas de cacahuete intencionadamente manipuladas para crear una nueva fibra textil, el Ardil.

Para Astbury, la difracción de los rayos X constituía la herramienta ideal para obtener pruebas experimentales de que determinadas propiedades físicas de una molécula emergían de las divergencias presentadas en la configuración espacial de sus átomos, o estereoisomerismo. Se manifestaba convencido de que las propiedades físicas de sustancias biológicas obedecían a las diferencias producidas en la forma tridimensional de sus moléculas componentes y el modo en que esas formas cambiaban.

—Luis Alonso



FORMS OF TRUTH AND THE UNITY OF KNOWLEDGE

Dirigido por Vittorio Hösle. The University of Notre Dame Press, Notre Dame, Indiana, 2014.

Unidad del conocimiento

Unidad del saber e interrelación entre las ciencias

La división de las universidades en departamentos, a menudo estancos, obedece a una razón histórica de demostrada eficacia. El incesante incremento de cada ciencia obliga a evitar la dispersión y generalización, para concentrarse y así seguir avanzando. Mas, al propio tiempo, los peligros asociados a esta hiperespecialización son múltiples y conocidos, develados por pensadores tan dispares como José Ortega y Gasset y Karl Popper. No solo existen interferencias necesarias (la física teórica deviene matemática con frecuencia creciente), sino que la creación e investigación en un campo extrae sumo provecho de los métodos y progresos de otros. Las reuniones interdepartamentales se han ido extendiendo por doquier. Por una razón poderosa: la realidad es única y sus interpretaciones y aproximaciones recogen aspectos regionales o parciales. En esos seminarios, se hace patente la existencia de bases comunes, mutuas dependencias o reducciones de una disciplina a otra y posibles solapamientos.

Las primeras reflexiones sobre el conocimiento y sus múltiples formas aparecieron en la Escuela Eléata, en la época presocrática, con la distinción entre la vía de la opinión y la vía de la verdad. El siglo v antes de Cristo asistió también a la aparición de la matemática teórica; en efecto, el descubrimiento de magnitudes inconmensurables, no más tarde del 450 a.C., elevó la matemática desde su situación de herramienta útil para ayudar a resolver problemas prácticos hasta el nivel de ciencia autónoma, que, al propio tiempo, nos acerca al conocimiento del mundo físico.

El estatuto epistémico peculiar de la matemática y el estatuto ontológico de sus objetos fueron los dos problemas que motivaron la filosofía de Platón. Mientras que la creencia (*pistis*) y la imaginación (*eikasía*) se ocupaban de los objetos físicos y sus imágenes, se atribuía a la cognición (*noesis*) y el pensamiento (*diánoia*) la tarea de descifrar del mundo inteligible. Xenócrates, su discípulo, propone subdividir la filosofía en lógica, física y ética.

Pero es a Aristóteles a quien debemos el sistema más elaborado sobre teoría del conocimiento en el período clásico. Para Aristóteles, todo conocimiento es teórico, práctico (moral) o productivo (creador, relacionado con alguna habilidad). Las ciencias teóricas se sitúan en el nivel más alto porque versan sobre la contemplación, fuente última de felicidad. El conocimiento teórico comprende la física, la matemática y la teología; el práctico abarca la ética y la política; el poiético, la poesía y otras subdisciplinas menores.

Ya en el Medievo, la lógica constituiría una cuarta parte en el *Didascalion* de Hugo de san Víctor. En *De reductione artium ad theologiam*, san Buenaventura incluye el trívium (gramática, lógica y retórica) en su sistema e insiere, entre la ética y la política, la economía (entendida como la gestión de lo doméstico o familiar). La filosofía medieval subordinaba todo conocimiento a la teología. El movimiento de traducciones de los clásicos griegos al latín constituyó uno de los factores determinantes de la restauración científica del siglo xii. En particular, la introducción del corpus aristotélico, que fue abriéndose en las universidades que se iban fundando. Así, la exposición del *Organon, Tópicos, Categorías* y *Analíticos* entró en el curriculum de la facultad de artes. Se enseñaban los *libri naturales* del estagirita, junto con el *De anima*, o psicología, y los *Metafísicos*. La asimilación de la filosofía natural fue gradual. En ciertos casos sufrió una fuerte oposición, especialmente en la Universidad de París, a partir de 1215. En *De reductione artium ad theologiam*, Buenaventura cita las artes mecánicas, cognición sensible

y cognición filosófica, entre las etapas principales de conocimiento. A finales del siglo XIII la filosofía natural aristotélica estaba asentada. Sus ideas biológicas habían penetrado en las doctrinas médicas.

El esfuerzo más impresionante para sistematizar el conocimiento a comienzos de la modernidad se lo debemos a Francis Bacon y su *Of the proficience and advancement of learning, divine and human,* publicado en 1605. Bacon no quiere limitarse a las ciencias establecidas, sino que se propone explorar partes del aprendizaje inéditas. Divide las ciencias de acuerdo con las tres partes del entendimiento humano: memoria (historia), imaginación (poesía) y razón (filosofía). Subdivide la historia en natural, civil, eclesiástica y literaria. Los conocimientos, escribió, son pirámides, en cuya base se encuentra la historia. Así, la base de la filosofía natural es la historia natural.

Descartes no tardó en poner en cuestión el sistema baconiano, con su radical separación entre sustancia extensa y sustancia pensante. Otra mente poderosa, Inmanuel Kant, confina espacio, tiempo y causalidad en el dominio de la intuición; en cambio, los juicios sintéticos a priori no implican un conocimiento innato. Más cercano en el tiempo, Edmund Husserl distinguía en sus *Investigaciones lógicas* entre ciencias teóricas o abstractas y ciencias concretas u ontológicas. La geografía y la historia natural serían ciencias concretas; su unidad está constituida por el objeto común de que se ocupan, a menudo utilizando métodos completamente diferentes (pensemos en la distinción entre geografía física y antropogeografía). Las ciencias teóricas, la física matemática por ejemplo, se fundarían en principios homogéneos de explicación.

La aparición de una nueva disciplina obedece a varias causas. Recojamos dos: el descubrimiento de estratos inéditos de la realidad, sea por viajes de exploración a partes de la Tierra o del cosmos hasta entonces desconocidas, sea el invento de nuevos instrumentos de observación, como microscopios y telescopios. La antropología fue alumbrada por la conquista del Nuevo Mundo, la microbiología por el desarrollo de microscopios en el siglo XVII. Los programas espaciales de los años sesenta impulsaron una nueva rama de la biología llamada exobiología, centrada en la búsqueda de vida más allá de la Tierra.

El desarrollo de nuevos útiles teóricos, por lo común matemáticos, nos permite unificar conjuntos de hipótesis y, con ello, conferir estatuto teórico a una disciplina. El éxito de la física moderna va inextricablemente unido al cálculo. Las ciencias sociales despegaron con la aplicación de la estadística a los datos sociales. Lo que constituye una disciplina son los lazos lógicos entre sus diferentes tesis que la integran en un todo coherente, consistente.

Peculiaridad de nuestro tiempo ha sido la introducción firme de la ciencia en campos antaño reservados a la filosofía. Por mor de ejemplo, mencionemos el estatuto de la ética. ¿Es materia filosófica o es materia científica? En el libro coral que aquí reseñamos, Francisco J. Ayala nos acerca a las bases biológicas de la filosofía moral, en una senda que ya habían abierto Edward Wilson y otros. Para ello resaltan el anclaje filogenético de nuestra especie, que ha evolucionado a partir de otras no humanas. Nuestros parientes más estrechos son los grandes simios y, de ellos, chimpancés y babuinos nos son más cercanos que los gorilas, y mucho más que lo son a los orangutanes.

Postura erecta y un cerebro poderoso constituyen las peculiaridades más notorias de la anatomía humana. Somos los únicos vertebrados con marcha bípeda y postura erguida; las aves son bípedas, pero su esqueleto es horizontal, no vertical (con la singular excepción de los pingüinos). El tamaño del cerebro suele ser proporcional al tamaño corporal; con relación a la masa corporal, los humanos poseen el cerebro mayor y más complejo: pesa un promedio de 1380 gramos en el varón y de 1200 gramos en la mujer. El peso del cerebro del chimpancé es de 420 gramos. Ligeramente mayor el del gorila. El de un varón humano adulto tiene un volumen de 1400 centímetros cúbicos (cc).

Hasta fecha reciente, los evolucionistas plantearon la cuestión sobre qué se adquirió primero, si la marcha bípeda o el cerebro poderoso. La cuestión ha quedado ya resuelta. Nuestros antepasados *Australopithecus* tenían, desde hace cuatro millones de años, una marcha erecta, pero un cerebro pequeño, de unos 450 cc, el peso de una libra. Las manos de los homininos que vivieron hace unos tres millones de años tallaban instrumentos.

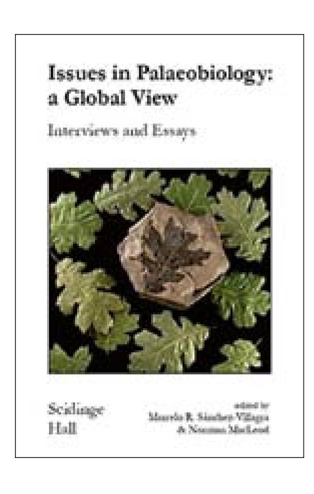
Los humanos no solo divergen de otros animales en su anatomía, sino también, y no es menos importante, en su comportamiento, individual y social. Un elenco de esas discrepancias incluiría: pensamiento abstracto, categorización y raciocinio, por lo que se refiere a la inteligencia; lenguaje simbólico creador; autoconsciencia y consciencia de la muerte; fabricación de herramientas y tecnología; ciencia, literatura y arte; ética y religión; organización social y cooperación (división del trabajo); códigos legales e instituciones políticas.

La teoría de la evolución se ha preocupado también de los fundamentos de la moral. No atribuimos conducta ética a los animales; al menos no a todos los animales y no en la misma medida que a los humanos. Por consiguiente, la evolución plantea cuestiones distintivas sobre los orígenes y contenidos de la conducta moral. ¿Está determinado por la evolución el sentido moral?

Si está determinado por la evolución, ¿en qué momento se adquirió? ¿Tenían desde un comienzo los humanos modernos un sentido ético? ¿Se regían los neandertales por normas morales? ¿Qué decir a ese respecto de *Homo erectus* y *Homo habilis*? ¿Cómo evolucionó el sentido moral? ¿Vino instado directamente por la selección natural? ¿O vino como un subproducto de otros atributos (la racionalidad, por ejemplo) que sí fueron objeto directo de selección, como propusieron Gould y Lewontin sobre las enjutas de san Marcos? ¿Es acaso el sentido moral un resultado de la evolución cultural más que de la evolución biológica? Y, concedido que así sea, habría que averiguar si el comportamiento ético viene directamente promovido por la selección natural o si es fruto de una manifestación epigenética de otro rasgo que sí es objetivo de la selección natural.

Propone Ayala que la evaluación de la acción moral emerge de la racionalidad humana; en términos darwinistas, de las facultades intelectuales altamente desarrolladas. Nuestra elevada inteligencia permite anticiparnos a las consecuencias de nuestros actos con respecto a los demás y, por tanto, juzgarlos como buenos o malos en términos de sus consecuencias para otras personas. En cambio, las normas a tenor de las cuales decimos que un acto es bueno o malo vienen determinadas en buena medida por la cultura, aunque condicionadas por las predisposiciones biológicas, como el cuidado de los padres en ofrecer un buen modelo de conducta.

—Luis Alonso



ISSUES IN PALEOBIOLOGY: A GLOBAL VIEW. INTERVIEWS AND ESSAYS

Preparado por Marcelo R. Sánchez-Villagra y Norman MacLeod. Scidinge Hall Verlag, Zúrich, 2014.

Paleobiología

Individuos, especies, ecosistemas y entornos fósiles

Salvo en contados recodos de tendencia geológica, los paleontólogos de la nueva síntesis darwinista mostraban un interés central en la biología y evolución de los organismos fósiles en sus ecosistemas. Miquel Crusafont, decano de la materia en España, declaraba, a este respecto, en las lecciones inaugurales de la asignatura, que la biología se dividía en paleontología, atenta al estudio de los fósiles, y neontología, que se ocupaba de las especies actuales. De la paleontología a la paleobiología no ha habido solución de continuidad, con la salvedad de que esta se ha beneficiado de un mayor número de expertos y dilatación del dominio de investigación.

El registro fósil facilita el acceso a pautas evolutivas y tendencias globales de la biodiversidad a través de las eras geológicas. En ello insiste la paleobiología desde su fundación, en 1912, por Othenio Abel. La disciplina adquirió plena madurez epistemológica en los años setenta con los trabajos de un grupo de paleontólogos norteamericanos integrado, entre otros, por Niles Eldredge, Stephen Jay Gould, David M. Raup, Thomas J. M. Schopf y Stephen M. Stanley. Empezaron por admitir la estasis morfológica de las especies, un fenómeno que implica que el cambio evolutivo se concentró en episodios de especiación geológicamente breves. Esta teoría del equilibrio puntuado, elaborada por Eldredge y Gould, tuvo una implicación importante que no se reconoció en el comienzo: la macroevolución debe operar mediante la selección de especies, análoga a la selección de individuos en la evolución darwinista. Gould en particular influyó en el movimiento de la taxonomía numérica; aplicó métodos matemáticos a la alometría, morfología y heterocronías.

Pese a todo, los paleontólogos no han descuidado los métodos tradicionales, incluido el más sencillo, la observación directa. De ese medio se sirvió el recientemente fallecido Adolf Seilacher (1925-2014) en su interpretación de los enigmáticos especímenes de Ediacara, que datan de hace unos 578 millones de años, antes de la aparición de los principales filos animales durante la explosión del Cámbrico. Seilacher entró en la Universidad de Tubinga en 1945. Allí el paleontólogo Friedrich von Huene le enseñó el uso de la cámara lúcida, un aparato con un prisma y un espejo que proyecta la imagen del espécimen en una lámina de papel para que pueda dibujarse. En una expedición a Salt Range, en Pakistán, Seilacher y su alumno Otto Schinbdewolf descubrieron huellas de trilobites en rocas tempranas del Cámbrico, que aportaron claves para descifrar el estilo de vida de los animales.

Seilacher mostró también de qué modo los fósiles traza (los que registran una actividad biológica, como la excavación subterránea de animales marinos) revelan rasgos de conducta. Analizó influencias que conforman la morfología de los invertebrados y mostró cuán excepcionalmente los conjuntos fósiles conservados (denominados por él *Lagerstätten*) eran resultado de condiciones tales como la escasez de oxígeno, rápido enterramiento y el efecto de películas microbianas que sellaban la superficie del sedimento.

La paleontología es una ciencia en continua progresión. Por botón de muestra, traigamos a colación algunos de los últimos hallazgos más importantes. Empecemos por el relativo a la estilización de los huesos del esqueleto humano con el tiempo. Los huesos de chimpancé se encuentran inmersos en estructuras microscópicas que conforman un hueso esponjoso, lo que no acontece en los huesos de los humanos modernos, expuestos a fracturas y osteoporosis. Un reciente estudio comparado de *Australopithecus,* neandertales y primeros *Homo sapiens* nos muestra que presentaban densidades de hueso esponjoso mucho mayores que los humanos modernos, fenómeno que se atribuye a un estilo sedentario de vida.

Conocida es la riqueza del registro fósil de équidos, modelo de procesos evolutivos. Una nueva calibración de la filogenia de *Equus,* basada en la secuencia genómica de un équido de comienzos del Pleistoceno (hace entre 4 y 4,5 millones de años) sugiere que el linaje de *Equus* dio origen a los caballos, cebras y asnos contemporáneos. Otra cuestión en el desarrollo de la paleontología lo constituye la evolución temprana de vertebrados dotados de mandíbula (gnatostomos). El equipo dirigido por Martin D. Brazeau ha aplicado la tomografía computerizada a la caja craneana de un espécimen de 450 millones de edad procedente del Devónico inferior de Siberia, un osteíctio. Han descubierto que el cráneo era una mezcla de características observadas por separado en los osteíctianos, condrictianos o en ninguno de ellos. El análisis filogenético sitúa a los peces en la base de los gnatostomos y sugiere que los enigmáticos acantodianos (grupo extinto de peces fósiles) estaban emparentados con peces cartilaginosos.

Un cuarto ejemplo tiene que ver con la incompletitud del registro fósil, que impide identificar el origen de muchos de los clados de vertebrados más derivados. Tal es el grupo de los Ictiopterigios, un clado de reptiles marinos que aparecieron a comienzos del Triásico, sin que se conozcan intermedios. El examen de un inctiosauriforme basal procedente del Triásico inferior (hace unos 248 millones de años) de China presenta un esqueleto primitivo que indica posibles hábitos anfibios.

Otro ejemplo: ¿quiénes eran los gondwanaterios? Durante decenios han estado envueltos en el misterio. Los Gondwanatheria constituían una rareza mamífera. Solo se conocían restos fragmentarios (dientes aquí y allí y, excepcionalmente, algún trozo de mandíbula). Su conformación era propia de omnívoros y herbívoros, pero se desconocían sus relaciones de parentesco con los otros miembros del árbol de los mamíferos. El descubrimiento de un cráneo entero de un nuevo género de gondwanaterio ofrece pruebas y datos que resuelven el misterio y revela la existencia

de una sorprendente diversidad morfológica en los mamíferos primitivos. El cráneo, de 12,41 centímetros de longitud, pertenece a un individuo de la especie *Vintana sortichi*; se descubrió en la formación Maevarano de Madagascar. Se presume que se trataba de un herbívoro de ojos grandes, ágil y con un desarrollo extraordinario del olfato. El cráneo constituye un mosaico de rasgos primitivos y derivados, reflejo quizá de una larga historia evolutiva en aislamiento geográfico.

Las fosforitas de la formación ediacarense de Doushantuo (de unos 600 millones de años de antigüedad) produjeron microfósiles esferoides con un patrón de división celular palintómica. Se han recuperado fósiles esferoidales procedentes de fosforitas negras de dicha formación. Y ahora sabemos que acometían la división celular, había separación entre gametos y células somáticas y pasaban por la muerte celular programada. Por fin, en la formación de Bugiin Tsav, Mongolia, se encontró en 2009 la extremidad anterior izquierda de un espécimen de *Deinocheirus*. El fósil superaba en un 6 por ciento la longitud del holotipo. El análisis cladístico realizado ahora indica que *Deinocheirus* constituía el miembro más poderoso de los Ornithomimosauria, lo que no empece que presente caracteres que le distinguen del resto del grupo. Nos hallaríamos ante un animal pesado, con un hocico pronunciado, mandíbula profunda, espinas neurales muy altas, pigostilo, fúrcula en U, pelvis extensa para los anclajes musculares. De los restos de peces encontrados en su estómago se infiere su dieta megaomnívora y un hábitat mésico.

Las cuestiones centrales de la paleobiología son las relacionadas con el proceso de especiación y radiación en el espacio y el tiempo. Es decir, las variables genéticas y ecológicas, que nos conducirán a la evolución filogenética de las especies. En el transcurso del tiempo geológico y hasta el presente, la vida en el mar presenta una exuberancia de biodiversidad fascinante. Pensemos en protozoos marinos, en particular en los foraminíferos, cuya investigación resulta ahora impensable sin atender a la paleobiología, paleoclimatología, paleogreografía, paleoecología y posible fisiología de formas extintas mediante la comparación con análogos vivos. Los foraminíferos, eucariotas unicelulares, han vivido en los océanos durante más de 500 millones de años. En razón de su estrategia de vida se dividen en dos tipos: foraminíferos planctónicos y foraminíferos bentónicos. Los bentónicos, que habitan en las profundidades, presentan un tamaño oscilante entre menos de 100 micras hasta un diámetro máximo de centímetros. Los de mayor talla poseen estructuras internas complejas. Los planctónicos han evolucionado a partir de los bentónicos del Triásico; no suelen superar las 600 micras. Foraminíferos vivos y fósiles presentan una amplia variedad de formas y tamaño. La complejidad morfológica de sus conchas y su evolución en el curso del tiempo ayudan a interpretar cuestiones fundamentales de paleobiología. Del conocimiento de la forma y estructura de los grandes foraminíferos se vale, para su progreso, la bioestratigrafía de entornos de aguas someras. En los horizontes estratigráficos queda recogida la evolución. Las formas primitivas persistieron y superaron condiciones adversas y episodios de grandes extinciones; además, dieron origen a formas gradualmente más especializadas y complejas.

Los grandes foraminíferos medran en muchos medios. Con su estrategia de reproducción aplazada, presentan una vida media muy larga; los grandes *Nummulites* llegan a los cien años. Desde hace años se viene investigando la genética de los foraminíferos que permite establecer las relaciones de filogenia entre grupos. Los experimentos con cultivos bajo condiciones ambientales controladas (temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto, contenido en nutrientes, concentración de elementos traza y riqueza isotópica) nos habrán de permitir interpretar mejor el comportamiento ecológico natural y las tolerancias ambientales. Se sirven de pseudópodos para capturar partículas nutricias; descifradas la salinidad, temperatura, densidad de agua e iluminación, conoceremos la naturaleza, estilo de vida, hábitos y evolución de especies extintas de foraminíferos.

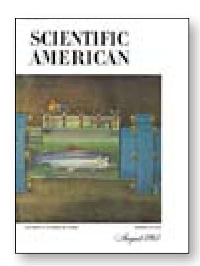
No todo es avance. Las plantas son cruciales en el funcionamiento de la Tierra, al menos en su superficie. Condicionan el clima, la geoquímica y erosión del suelo. Son fuente y sumidero de carbono. Nuestro conocimiento sobre esas cuestiones procede de la mano del descubrimiento de plantas fósiles, de su taxonomía, sistemática y fisiología. No obstante, nos sentimos abrumados por las carencias. ¿Cómo eran los licópsidos arborescentes del Carbonífero? Ignoramos su metabolismo, vida media y forma de nutrición. El mundo moderno está dominado por las plantas con flores, muy distinto del que predominaba en tiempos pasados; las propias coníferas del Paleozoico divergían mucho de las coníferas actuales.

La región de mayor biodiversidad del planeta se ubica en los trópicos de América del Sur (que comprenden un extenso número de ecosistemas, de las selvas alpinas de los Andes hasta desiertos y sabanas, páramos y pluviselvas). Para hacerse una idea: 50 hectáreas de la pluviselva del Ecuador tienen más especies arbóreas que, juntos, Estados Unidos y Canadá. Desde hace tiempo se conoce este fenómeno, denominado gradiente latitudinal de la diversidad. Los científicos han propuesto hasta 25 hipótesis diferentes para explicar los gradientes, aunque ninguna resulta satisfactoria. La razón de tanta controversia es que no se puede resolver el origen del gradiente latitudinal de la diversidad sin el uso del registro fósil. Al fin y al cabo, el gradiente que observamos hoy es el fruto de la acción del tiempo geológico.

Pero, ¿en qué medida se epitomiza en el registro fósil la historia real de la vida? Todos los campos de la paleobiología, sea de nivel microevolutivo o macroevolutivo, dependen de un dominio seguro del registro fósil. Todavía conocemos de una manera muy imperfecta el registro de organismos, poblaciones, especies, filos y comunidades ecológicas en diferentes escalas temporales y espaciales. A escala temporal global y geológica, lo vemos ejemplificado en el origen de los ecosistemas terrestres tróficamente modernos y en la colonización de tierra firme por plantas y animales, uno de los principales acontecimientos de la historia de la vida. Entre el Cámbrico y el Ordovícico Medio no existen pruebas fósiles incuestionables de colonización de la tierra. El registro fósil de plantas continentales comienza, en el Ordovícico, con esporas, pero hasta el Silúrico tardío no empiezan a aparecer fósiles de plantas. El registro fósil de los subsiguientes invasores de tierra firme, los artrópodos, es, con mucho, más incompleto. Diversos grupos invadieron el suelo firme independientemente; su fosilización dependía de ciertas condiciones especiales y favorables, amén de entornos sedimentarios. Los fósiles de artrópodos más antiguos son restos de milípedos del Silúrico y arácnidos. Los insectos no aparecieron hasta comienzos del Devónico.

—*Luis Alonso*

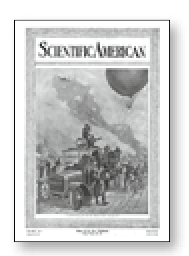
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Agosto 1965

Astronomía infrarroja

«Con el telescopio de reflexión de 254 centímetros de Monte Wilson, investigadores del Instituto de Tecnología de California han efectuado mediciones de las bandas de absorción del dióxido de carbono en la radiación infrarroja fotográfica procedente de Marte. Su conclusión es que tal compuesto abunda menos de lo que habían indicado unas mediciones anteriores menos precisas. Ello implica que la presión atmosférica en la superficie de Marte es de unos 0,025 kilogramos por centímetro cuadrado, o sea, el 2,5 por ciento de la presión atmosférica terrestre de un kilogramo por centímetro cuadrado a nivel del mar. La atmósfera marciana podría ser, por tanto, demasiado tenue para admitir un vehículo con alas o un paracaídas, las dos posibilidades consideradas para depositar en el planeta cápsulas instrumentales desde una astronave.»



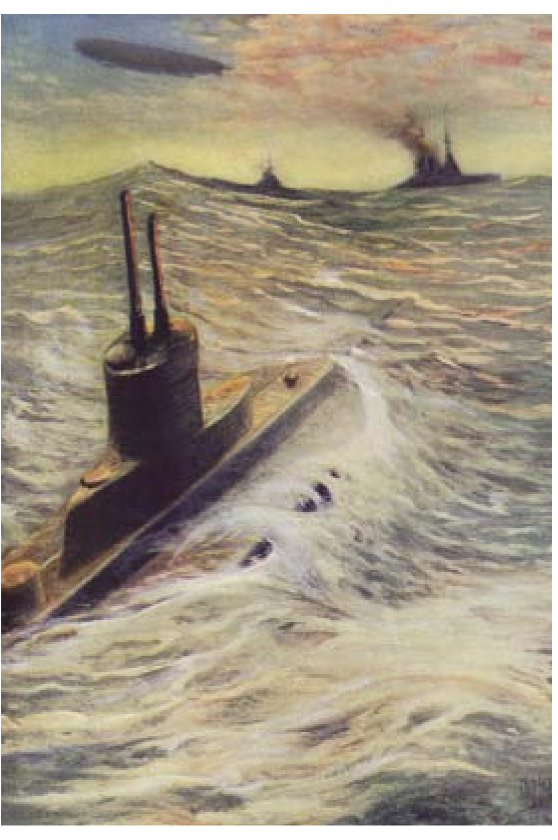
Agosto 1915

La vacuna antitifoidea

«Durante la guerra franco-prusiana (1870-1871) la fiebre tifoidea produjo miles y miles de bajas entre las tropas. La inmunidad frente a esta enfermedad en el presente conflicto se debe en parte a un mejor conocimiento de los fundamentos de la higiene y el saneamiento, gracias sobre todo a la contribución de los investigadores. Años de minucioso trabajo de laboratorio han dado como resultado la vacuna antitifoidea, la cual está poniendo a salvo de esta epidemia a los ejércitos. En 1911 se hizo obligatoria la vacunación en el Ejército de EE.UU., medida cuya efectividad la revela el hecho de que en 1912 la mortalidad por tifus fue de 16,5 por cien mil en ese país y nula en su ejército.»

La Primera Guerra Mundial en el mar

«Al ver que sus barcos de guerra se hallan seguros en sus puertos, que su flota mercante ha sido expulsada de las rutas marítimas y que ha sido privada de la mayor parte de los abastecimientos que le llegan por mar, a Alemania no le queda más que un único recurso militar; a saber, la guerra secreta de las minas y los submarinos (*véase la ilustración*). Con estos últimos se ha anotado el máximo éxito.»



GUERRA SUBMARINA: Un cazador sigiloso al acecho de su presa, 1915.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIII, N.º 6, 7 DE AGOSTO DE 1915

Cine y meteorología

«Las primeras proyecciones del pronóstico del tiempo en una pantalla de cine se realizaron en Birmingham (Alabama) en enero de 1912. Desde entonces, esa forma de mostrarlo se ha extendido a 15 ciudades y 27 salas de cine. La Agencia de Meteorología de EE.UU. está dispuesta a proporcionar sus pronósticos para tal fin siempre que se desee, pero esa petición está limitada por el hecho de que la mayoría de las sesiones cinematográficas no empiezan hasta una hora después de que el mismo pronóstico ya ha aparecido en los diarios de la tarde.»

Alquileres prohibitivos

«Uno de los males sociales de las grandes ciudades es la carencia de viviendas para gentes de pocos medios. Y eso nadie lo sufre más que los trabajadores mecánicos. Tras una dura jornada de trabajo entre el ruido y el traqueteo de las fábricas, necesitan un hogar limpio y tranquilo donde refrescarse para la labor del día siguiente. Pero en Nueva York, y en la mayoría de las grandes ciudades, eso es algo inalcanzable. Todo trabajador que desee vivir cómodamente debe pagar un alquiler muy superior a sus posibilidades, y si se decide por la otra opción (un alquiler bajo), las únicas ofertas corresponden a habitaciones atestadas, en pisos a mucha altura de la calle, que apestan a olores corporales y hediondeces.»



Agosto 1865

La recolecta del algodón

«Desde que acabó la guerra, el cultivo del algodón ha atraído la atención de muchos con el laudable propósito de abastecer al mercado e inaugurar factorías para satisfacer las demandas de la población. Los antiguos métodos de obtención de esta fibra no están desde luego a la altura del espíritu que impregna las operaciones actuales. Esa cultura de la chapuza y la desgana debe ceder el paso a unos procedimientos más dinámicos, sistemáticos y fundamentados, y así conseguir dos cápsulas donde antes crecía solo una.

Hacen falta máquinas, pero una es especialmente necesaria más que cualquier otra: la cosechadora de algodón.»




ASTROFÍSICA

El misterio del universo escondido

Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln

Las invisibles partículas de materia oscura que dominan el cosmos podrían darse en extrañas y variadas formas.



EVOLUCIÓN

Del lobo al perro

Virginia Morell

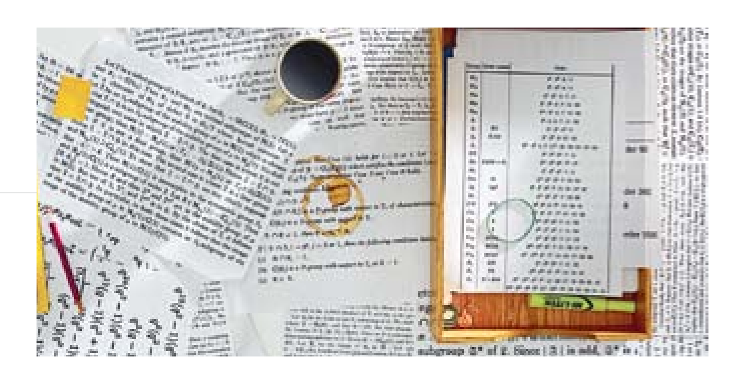
¿Cómo un carnívoro temible acabó convertido en el mejor amigo del hombre?

ENERGÍA

El eclipse del silicio

Varun Sivaram, Samuel D. Stranks y Henry J. Snaith

Un material en alza, la perovskita, permitiría fabricar células solares más baratas y eficientes que las derivadas de la tecnología imperante basada en el silicio.



MATEMÁTICAS

El catálogo del universo

Stephen Ornes

Los matemáticos más veteranos se están dando prisa para poner a salvo las 15.000 páginas de la demostración del Teorema Enorme.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes, Mapa de la regulación epigenética, Freno al dengue y Recuperar las zonas húmedas*; Fabio Teixidó: *Reservas intocables y En busca de tesoros sumergidos*; Manuel Pardo de Santayana: *Los beneficios del conocimiento tradicional sobre las plantas*; Luis Bou: *La plasticidad del cerebro adolescente*; Javier Grande: *Toda la luz del universo*; Juan Pedro Adrados: *Un cohete para llegar a Marte*; Guzmán Sánchez: *Riesgos de la edición genética*; Carles Puig: *Un submarino de doble casco*; Alberto Ramos: *Aislantes topológicos*; Ramón Muñoz Tapia: *El kapnoscopio: ver para creer*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España